

**Análise da produção do biogás no aterro
Sanitário Canhanduba - Itajaí/SC, 2010**

Fabiana Valois Thiesen

Orientador: Armando Borges de Castilhos Junior, Dr

2010/1



**Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**ANÁLISE DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS NO
ATERRO SANITÁRIO CANHANDUBA - ITAJAÍ/SC, 2010**

Fabiana Valois Thiesen

FLORIANÓPOLIS, (SC)

JULHO/2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINACURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS NO
ATERRO SANITÁRIO CANHANDUBA - ITAJAÍ/SC, 2010**

Fabiana Valois Thiesen

**Trabalho a ser
apresentado à
Universidade Federal de
Santa Catarina para
Conclusão do Curso de
Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental**

**Orientador
Dr. Armando Borges de Castilhos Junior**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
JULHO/2010**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
SANITÁRIA E AMBIENTAL

ANÁLISE DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS NO ATERRO
SANITÁRIO CANHANDUBA - ITAJAÍ/SC, 2010

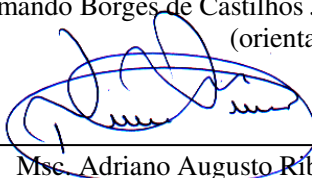
FABIANA VALOIS THIESEN

Trabalho submetido à Banca
Examinadora como parte dos requisitos
para Conclusão do Curso de Graduação
em Engenharia Sanitária e Ambiental–
TCC II

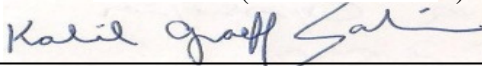
BANCA EXAMINADORA:



Dr. Armando Borges de Castilhos Jr
(orientador)



Msc. Adriano Augusto Ribeiro
(Membro da Banca)



Engº Kalil Graeff Salim
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)
JULHO/2010

THIESEN, F. V. *Análise da produção do biogás no aterro sanitário Canhanduba - Itajaí/SC*, 2010. 76 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo estimar o potencial de produção de biogás no aterro sanitário de Canhanduba, localizado na cidade de Itajaí, estado de Santa Catarina – Brasil a fim de comparar com a produtividade do ano anterior. Para alcançar este objetivo foi realizada uma estimativa teórica da produção de biogás ao longo dos anos. Utilizou-se o método conhecido por Decaimento de Primeira Ordem, além disso, foram realizadas medições em campo para verificar a disponibilidade atual de biogás. Foram realizadas 10 campanhas de monitoramento de vazão e concentração dos gases dos drenos. Para as amostragens realizadas, a média da produção de biogás do aterro sanitário de Canhanduba foi de 7.072,9 Nm³ /d, tendo uma média de 442 Nm³ /d para cada dreno amostrado. Os resultados indicam uma produção menor de biogás na células medidas quando comparadas ao estudo realizado em 2009, porém ao somarmos as produções, o aterro apresenta um elevado potencial de aproveitamento energético.

Palavras chave: Aterros Sanitários, Biogás, Potencial Energético.

THIESEN, F. V. Analysis of biogas production in landfill Canhanduba-Itajaí, 2010. 76 p. Final year project (Sanitary and Environmental Engineering) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

ABSTRACT

The present study aimed to estimate the potential of biogas production in the sanitary landfill Canhanduba, located in the city of Itajaí, state of Santa Catarina - Brazil in order to compare with the previous year's productivity. To reach this goal was accomplished a theoretical estimation of biogas production over the years. The method known as First Order Decay, moreover, field measurements were carried out to verify the current availability of biogas. Ten (10) campaigns were conducted monitoring of flow and concentration of gases of drains. For sampling performed, the average production of biogas from landfill Canhanduba was 7,072.9 nm³/d, taking an average of 442 nm³/d to each sampled drain. The results indicate a smaller biogas production in cells measures when compared to the previous study, but when you add, the landfill productions presents a high potential for energy use.

Key words: Landfill, Biogas, Energy Potencial.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha família pelo carinho, amor e confiança depositados em mim durante todos esses anos de faculdade. Meu pai Luiz, minha mãe Suzana e meu irmão Gabriel.

Ao professor Armando Borges de Castilhos Jr. por ter acreditado em meu trabalho e fazer o convite para entrar para o grupo do LARESO, que me proporcionou a realização desta pesquisa.

Ao pessoal do Laboratório, Cláudia, Chico e, especialmente, à Iracema de Souza Maia, por todo tempo dedicado a me acompanhar nas idas ao aterro, tirar minhas dúvidas e transmitir seus conhecimentos.

Ao CNPq e FINEP pelo apoio financeiro do projeto “Aproveitamento Energético do Biogás no Aterro Sanitário de Itajaí-SC para geração de energia elétrica e térmica”, bem como seus coordenadores professor Narciso Angel Ramos Arroyo e Armando Borges de Castilhos Junior realizando a união entre os dois departamentos, Engenharia Mecânica e Engenharia Sanitária.

Aos professores do Curso de Graduação de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC, pelos ensinamentos passados durante todos esses anos.

Aos meus amigos da faculdade, principalmente ao meu companheiro de muitos momentos grandiosos durante este percurso, Robson Ricardo Resende. Dedico a ele toda a minha evolução pessoal desses últimos anos e que sem ele, meu caminho até aqui seria muito mais difícil.

Ao Edevaldo da Engenharia Mecânica por tornar possível a realização das medições através da criação de equipamentos muito úteis.

À empresa Ambiental Saneamento e Concessões (AMBSC), por dispor o Aterro Sanitário Canhanduba para pesquisa. Em especial, Eng. Everton, Elaine, Sidnei e todos os outros trabalhadores do aterro que sempre foram muito atenciosos.

Muito Obrigada.

**“Não é merecedor do favo de mel
aquele que evita a colméia
porque as abelhas tem ferrões”**

William Shakespeare

SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMBSC – Empresa Ambiental Saneamento e Concessões
ANA – Agência Nacional das Águas
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH₄ - Gás Metano
CNTP - Condições Normais de Temperatura e Pressão
CO₂ – Gás Dióxido de Carbono
CO₂e - Carbono Equivalente
COP-3 - Conferência entre as Partes III
DCP - Documento De Concepção De Projeto
EOD - Entidade Operacional Designada
EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
Famai - Fundação Municipal de Amparo ao Meio Ambiente de Itajaí
GEE – Gases de Efeito Estufa
GPS – *Global Position System*, em português “Sistema de Posicionamento Global”
H₂ – Gás Hidrogênio
H₂O – Vapor de Água
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IUPAC - *International Union of Pure and Applied Chemistry*, em português “União Internacional de Química Pura e Aplicada”
k - Constante da decaimento (ano⁻¹)
L₀ – Potencial de Geração de Metano (m³/ton)
MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME – Ministério de Minas e Energia
MW – MegaWatts (unidade de potência)
N₂ – Gás Nitrogênio
NBR – Norma Brasileira
Nm³/dia – Normal Metro Cúbico por Dia
NMOC – *Nom Methane Organic Components*, em português “Componentes Orgânicos Não-Metano”
PCH – Pequena Central Hidrelétrica
PDD – *Project Design Document*, em português “Documento de Projeto de Design”
PEAD – Polietileno de Alta Densidade
pH – Potencial Hidrogeniônico

PMI – Prefeitura Municipal de Itajaí
PNMC – Plano Nacional sobre Mudanças do Clima
PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PPP – Participação Público Privada
PROINFA – Programa Brasileiro de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PVC – Cloreto de Polivinila
Res./ano – Resíduos Sólidos Urbanos Depositados por Ano
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
SIN – Sistema Integrado Nacional
SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
t CO₂/ano – Toneladas de Dióxido de Carbono por Ano
ton - Toneladas
USEPA – *United States Environmental Protection Agency*, em português “Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos”
UTM - Universal Transversa de Mercator

Lista de Figuras

Figura 4.1- Destinação final dos RSU coletados.....	23
Figura 4.2 – Detalhes de um aterro	25
Figura 4.3 - Análise qualitativa da geração dos principais compostos ao longo das fases de degradação de um aterro sanitário	26
Figura 4.4 - Número de Atividades de Projeto no Âmbito do MDL no mundo.....	37
Figura 4.5 - Número de Projetos Brasileiros por Escopo Setorial.....	37
Figura 5.1 - Mapa de localização do município de Itajaí	40
Figura 5.2 – Foto de satélite do aterro de Canhanduba modificado pela autora com os drenos de estudo plotados.	41
Figura 5.3 - Pontos de monitoramento do Aterro adaptada pela autora.	42
Figura 5.4 – Foto ilustrativa do bocal reduzido utilizado para as medições.....	48
Figura 5.5 - Termoanemômetro 471-2 da Dwyer usado na medição da vazão do biogás nos drenos	49
Figura 5.6 – Foto ilustrativa da medição de vazão do biogás, com dreno vedado, bocal reduzido utilizando o aparelho drager.	51
Figura 5.7 - Aparelho Dräger X-am 7000 utilizado para monitorar a qualidade do biogás	51

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Classificação dos resíduos sólidos quanto a origem ou natureza	20
Tabela 4.2 - Composição gravimétrica (%) dos RSU de algumas cidades brasileiras	21
Tabela 4.3 – Fases de degradação dos resíduos em um aterro sanitário e tempo de abrangência.....	27
Tabela 4.4 - Principais fatores que afetam a produção de biogás em aterros sanitários.....	28
Tabela 4.5 - Parâmetros do ambiente interno e suas implicações na geração do biogás	29
Tabela 4.6 - Potencial de influência dos principais parâmetros na geração de gases.....	30
Tabela 4.7 - Valores sugerido para L_0	31
Tabela 4.8 - Valores de k (ano-1), em função da precipitação	32
Tabela 4.9 - Características dos principais gases presentes no gás de aterro.....	32
Tabela 4.10 - Metas de redução de emissão de CO ₂ dos países do Anexo I do Protocolo de Quioto	35
Tabela 5.1 – Histórico de deposição de resíduos	43
Tabela 5.2 - Cenários propostos com diferentes valores para os coeficientes k e L_0	46
Tabela 5.3 - Propriedades do Anemômetro.....	49
Tabela 6.1 - Dados preliminares do aterro de Canhanduba.....	52
Tabela 6.2 - Projeção do recebimento de resíduos até o ano de fechamento do aterro, e o peso de resíduos acumulado	52
Tabela 6.3 - Número de ocorrência das porcentagens de metano presente no biogás.....	54
Tabela 6.4 - Dados médios das medições de vazão do biogás produzido nos drenos	56
Tabela 6.5 - Dados médios das medições de vazão de metano produzido nos drenos.....	57
Tabela 6.6 - Concentração média dos gases.....	60

Lista de Gráficos

Gráfico 6.1 - Curva de geração de metano no aterro, de acordo com os diferentes cenários.....	53
Gráfico 6.2 - Análise da média de biogás medido no aterro durante 10 campanhas.....	58
Gráfico 6.3 - Análise da média de metano medido no aterro durante 10 campanhas.....	59
Gráfico 6.4 - Vazões médias por dreno, concentração de metano em cada dreno e vazão de metano.....	60
Gráfico 6.5- Variações de CH_4 nos drenos ao longo do tempo.....	61
Gráfico 6.6 - Variações de CO_2 nos drenos ao longo do tempo.....	62
Gráfico 6.7 - Variações de O_2 nos drenos ao longo do tempo.....	63
Gráfico 6.8 - Variações de H_2S nos drenos ao longo do tempo.....	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.2	Objetivos Específicos	17
3	JUSTIFICATIVA.....	18
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1	Resíduos Sólidos	19
4.1.1	Definição e classificação.....	19
4.1.2	Composição do Resíduo Sólido Urbano	21
4.1.3	Destinação final do RSU	22
4.2	Aterro Sanitário	24
4.3	Geração de Biogás em Aterro Sanitário	26
4.3.1	Fases de Degradação de Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro Sanitário	26
4.3.2	Fatores de influência.....	27
4.3.3	Estimativa teórica de Geração de Biogás	30
4.3.4	Composição do Biogás de Aterro	32
4.3.5	Captação do biogás	33
4.3.6	Aproveitamento do biogás.....	33
5	METODOLOGIA	40
5.1	Local de Estudo	40
5.1.1	Características do Aterro.....	42
5.2	Estimativa Teórica do Biogás	44
5.2.1	Levantamento de dados preliminares	44
5.2.2	Curva de produção de biogás	44

5.3	Levantamento de Dados em Campo	46
5.3.1	Determinação da Vazão do Biogás	48
5.3.2	Determinação da Concentração do Biogás	50
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
6.1	Dados preliminares do aterro	52
6.2	Estimativa teórica da produção de gases	53
6.3	Medições em campo dos gases produzidos nos drenos	54
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
9	APÊNDICES.....	72
9.1	APÊNDICE A – Tabelas resultantes das medições em campo	72
9.2	APÊNDICE B	79

1 INTRODUÇÃO

Atualmente no Brasil, 81,25% da população vive no meio urbano (IBGE, 2000). Este processo de urbanização trouxe profundas mudanças favoráveis à evolução tecnológica que se refletem até os dias atuais. Porém, nem todas estas mudanças foram benéficas ao meio ambiente.

A disposição final dos resíduos sólidos urbanos é um dos graves problemas ambientais enfrentados no Brasil e no mundo. A própria palavra “lixo” transmite a impressão de que lixo é algo sem valor ou importância e que deve ser descartado. Em tempos mais recentes, o mau gerenciamento dos resíduos gerados, além de provocar gastos financeiros significativos, pode provocar graves danos ao meio ambiente e comprometer a saúde e o bem-estar da população.

Para se evitar os danos ou riscos causados à saúde e à segurança pública, a prática de utilização de áreas públicas para o aterramento do lixo é a mais comum, devido ao seu baixo custo e a facilidade de execução. Por outro lado, a necessidade de grandes áreas próximas aos centros urbanos, de grandes quantidades de material de cobertura, e os riscos de contaminação do solo, água e ar, demonstra a importância do seu devido controle.

Nos Aterros Sanitários ocorre a degradação da matéria orgânica presente no “lixo” depositado ao longo do tempo. Este processo de biodigestão, junto aos fatores naturais aos quais os resíduos estão sujeitos, transforma a fração orgânica dos resíduos em gases e líquidos. A mistura de gases gerados é denominada biogás, sendo este um combustível capaz de ser coletado e utilizado como fonte alternativa de energia. Os principais constituintes desses gases são o dióxido de carbono (CO_2) e o gás metano (CH_4).

O gás metano gerado em aterros, quando não devidamente controlado, seja por meio de sistemas de coleta e aproveitamento, seja pela queima nos drenos verticais, contribui para o agravamento do efeito estufa. Isso demonstra a importância do devido controle dos aterros sanitários tanto para a população, como também às questões ambientais globais.

Estudos sobre os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo criados a partir da meta de redução de emissão de carbono na

atmosfera mostram que os gases naturalmente produzidos nos aterros, podem ser utilizados na geração de energia, e adicionalmente, negociados através do Protocolo de Quioto assinado na Conferência do Clima, no Japão em 1997.

Visando-se obter dados qualitativos e quantitativos referentes à produção do biogás no aterro Sanitário de Canhanduba, localizado em Itajaí, Santa Catarina, o presente estudo teve como base outros estudos realizados no Laboratório de Resíduos Sólidos da UFSC. Os resultados obtidos darão subsídios para a instalação de um motor gerador de energia elétrica que utilizará o próprio biogás gerado no aterro como combustível, o qual abastecerá a sua unidade de tratamento do lixiviado.

Neste trabalho, serão abordadas as questões que envolvem a geração do biogás ao longo do tempo em aterros sanitários, os quais envolvem estudos de geração, captação e aproveitamento do metano gerado na massa de lixo. Estes estudos são necessários para que o projeto de aproveitamento energético do biogás de aterro tenha viabilidade tanto de execução quanto econômica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Levantamento da produtividade de biogás na área recente de operação do Aterro Sanitário de Canhanduba, Itajaí,SC, no ano de 2010 para análise comparativa.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Estimar através do modelo teórico *Dcaimento de primeira ordem*, a curva de produção de biogás no Aterro Sanitário de Canhanduba, SC;
- b) Avaliar os coeficientes k e L mais adequados, de acordo com o cruzamento de dados da medição em campo com a curva teórica produzida;
- c) Monitorar a vazão e concentração dos gases de 15 novos drenos do aterro sanitário de Canhanduba, visando um levantamento da produção atual de biogás;

3 JUSTIFICATIVA

A liberação do biogás gerado em aterros sanitários contribui significativamente para o aquecimento global, visto que o metano e o gás carbônico, principais gases constituintes deste, estão na lista dos maiores contribuintes no aumento da concentração dos Gases de Efeito Estufa (GEE). O biogás, recuperado e aproveitado de forma adequada nos aterros, é considerado uma fonte renovável de energia e uma alternativa para o abastecimento energético dos sistemas do aterro.

Além dos ganhos ambientais envolvidos na proposta, existe também uma potencial vantagem econômica no projeto, tornando-o de grande interesse para a sociedade.

Este trabalho visa expor uma alternativa para o abastecimento energético em aterros sanitários através de um estudo das tecnologias de aproveitamento do biogás produzido nestes locais. Analisando-se comparativamente dados de diferentes anos, pode-se diagnosticar a real eficiência do sistema proposto ao aterro em estudo.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Resíduos Sólidos

4.1.1 Definição e classificação

A NBR – 10004 de 1987 da ABNT denomina resíduos sólidos aqueles resíduos no estado sólido e semi-sólido que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. São incluídos os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, de equipamentos e instalações de controle de poluição, e líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Com relação à classificação dos resíduos sólidos, há vários tipos, que se baseiam em determinadas características ou propriedades identificadas. A norma NBR 10004, de 1987 trata da classificação de resíduos sólidos quanto a sua periculosidade, ou seja, característica apresentada pelo resíduo em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, que podem representar potencial de risco à saúde pública e ao meio ambiente. De acordo com sua periculosidade os resíduos sólidos podem ser enquadrados como:

Resíduos classe I – Perigosos

São aqueles que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas apresentam periculosidade, conforme definido anteriormente, ou uma das características seguintes: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

Resíduos Classe II A – Não Inertes

São aqueles que não se enquadram na classe I ou II B. Os resíduos classe II A. Podem apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Resíduo Classe II B – Inertes

São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente. Além disso, são resíduos que, quando amostrados de forma representativa e submetidos a contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, conforme teste de solubilização segundo a norma NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, com exceção dos parâmetros aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

MONTEIRO et al (2001) traz a classificação quanto a origem ou natureza, sendo a origem o principal elemento para a caracterização dos resíduos sólidos. A Tabela 4.1 a seguir, apresenta esta classificação.

Tabela 4.1 - Classificação dos resíduos sólidos quanto a origem ou natureza

Resíduo sólido doméstico ou residencial	Gerados nas atividades diárias em casas, apartamentos, condomínios e demais edificações residenciais.
Resíduo sólido comercial	Gerados em estabelecimentos comerciais.
Resíduo sólido público	Presentes nos logradouros públicos, em geral resultantes da natureza, ou aqueles descartados irregular ou indevidamente pela população.
Resíduo sólido domiciliar especial	Compreendem os entulhos de obras, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes e pneus.
Resíduo sólido de fontes especiais	Devido suas características peculiares merecem cuidados especiais em seu manuseio, acondicionamento, estocagem, transporte ou disposição final. Destacam-se: resíduos sólido industrial, radioativo, de portos, aeroportos e terminais rodoferroviários, agrícola, de serviços de saúde.

Fonte: Monteiro et al (2001)

4.1.2 Composição do Resíduo Sólido Urbano

As características dos resíduos sólidos urbanos variam de uma cidade para outra, podendo variar inclusive entre comunidades diferentes numa mesma cidade. Estas variações acontecem em função de aspectos sociais, econômicos, culturais, geográficos, sazonais e climáticos.

Os RSU são constituídos basicamente por matéria orgânica putrescível, papel/papelão, podas de árvores e gramados, plástico, vidro, material metálico ferroso e não ferroso, ossos e demais tipos de resíduos muitas vezes denominados de material inerte, dependendo dos critérios de caracterização física ou gravimétrica (CASSINI; VAZOLLER; PINTO, 2003). Na Tabela 4.2 pode ser observada a composição gravimétrica dos RSU em doze cidades brasileiras.

Tabela 4.2 - Composição gravimétrica (%) dos RSU de algumas cidades brasileiras

Cidade	Matéria orgânica	Papel e Papelão	Plástico	Metais	Vidro	Outros
Campina Grande ^(a) (PB)	56,8	13,6	15,5	1,5	1,1	11,5
Belo Horizonte ^(a) (MG)	65,4	10,2	11,6	2,6	2,5	7,7
Ouro Preto ^(a) (MG)	53,7	19,3	9,2	4,2	4,2	9,4
Vitória ^(a) (ES)	53,1	19,1	11,8	2,7	2,7	10,0
Rio de Janeiro ^(b) (RJ)	44,0	23	12	4	2,0	15,0
Botucatu ^(b) (SP)	74,1	7,6	8,4	3,9	2,0	4,0
Criciúma, Içara e Nova Veneza ^(b) (SC)	45,2	21,1	17,1	2,1	2,1	11,2
Florianópolis ^(b) (SC)	46,4	14,2	14,9	2,6	4,1	17,8
Caxias do Sul ^(b) (RS)	58,8	17,3	6,6	2,9	1,3	13,7
Porto Alegre ^(b) (RS)	52,1	15,0	12,4	2,5	1,9	16
<i>Média</i>	55,0	16,0	12	2,9	2,4	11,6
<i>Desvio Padrão</i>	9,4	4,8	3,3	0,9	1,0	4,1

Fontes: ^(a)Leite et al. (2003); ^(b)Orofino (2002)

4.1.3 Destinação final do RSU

Um dos principais problemas relacionados aos RSU ainda consiste na falta de destinação adequada em muitos municípios brasileiros, a qual de acordo com CASTILHOS JR. e REICHERT (2007) resulta em problemas ambientais (poluição do solo, da água e do ar), sociais (existência de catadores), econômicos (desvalorização do solo local) e de saúde pública (contaminações por vias diretas e indiretas).

Dos cerca de 162 mil toneladas de RSU coletados diariamente no Brasil, 30,5% são dispostos em lixões segundo os dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) realizada no ano de 2000 (IBGE, 2000) que podem ser verificados na Figura 4.1. A mesma pesquisa revela piores resultados em relação ao número de municípios: 63,6% dispõem seus resíduos em vazadouros a céu aberto (lixões). O termo “lixão” é definido por D’Almeida e Vilhena (2000) como uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos municipais caracterizada pela simples descarga sobre o solo, ignorando medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública.

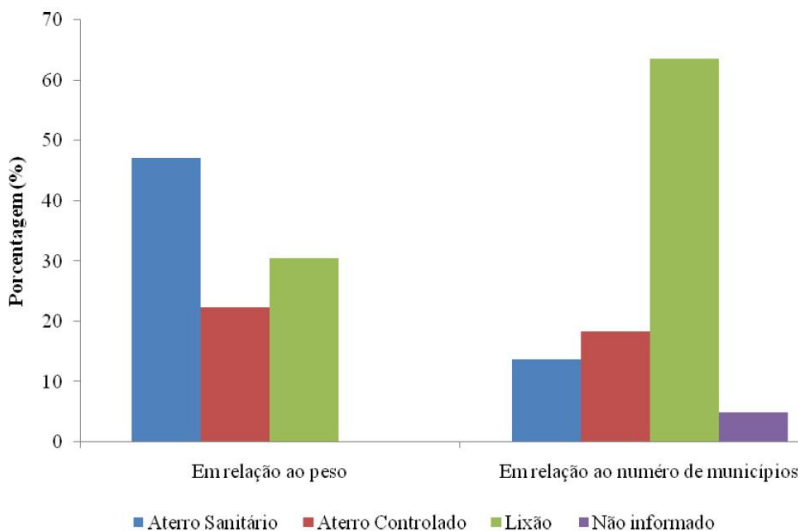


Figura 4.1- Destinação final dos RSU coletados

Ainda segundo a pesquisa citada, aproximadamente 76 mil toneladas de resíduos (47,1%) são dispostos em aterros sanitários, sendo considerado por CASTILHOS JR. et al (2003) como a técnica de disposição adequada dos RSU menor custo.

Embora cerca de 50% dos resíduos, coletados em peso, sejam destinados adequadamente, em se tratando da destinação quanto ao número de municípios, esse valor cai para 13,8%. Isso se explica pelo fato da maior parte dos municípios brasileiros possuírem população inferior a 20 mil habitantes não possuindo recursos financeiros para a implantação e/ou manutenção de um aterro sanitário.

Um estudo realizado por JUCÁ (2002) observou que as regiões Sul e Sudeste são as que possuem a maior quantidade de resíduos destinados em aterros sanitários, 40,5% e 37,1%, respectivamente. Segundo o mesmo autor, a grande dificuldade na implantação de aterros sanitários reside nos custos de operação que pressupõe tratamento adequado de líquidos e gases efluentes, além de todos os demais cuidados previstos nas normas técnicas.

Em pesquisa realizada pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina (SDM, 2001) verificou-se que a disposição dos resíduos

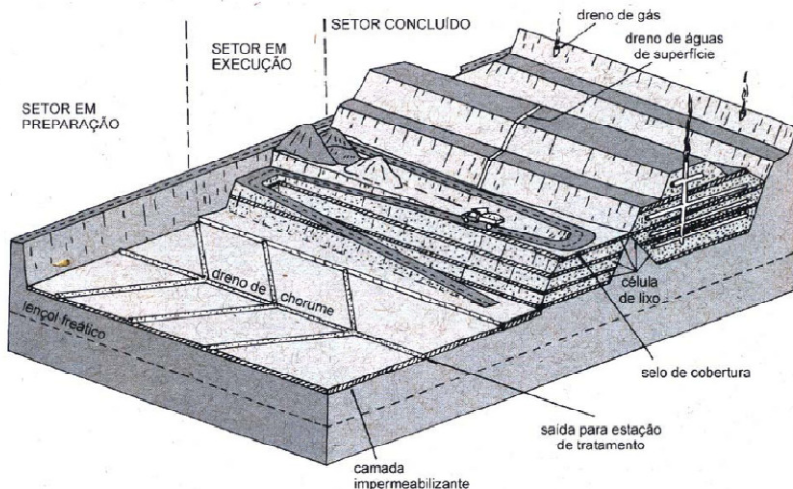
sólidos em aterros sanitários licenciados pelo órgão de controle ambiental do Estado (FATMA – Fundação do Meio Ambiente) representava apenas 16,5% dos resíduos gerados pela população urbana. Com o intuito de reverter essa situação, o Ministério Público de Santa Catarina implantou em 2001 o programa “Lixo nosso de cada dia” que através de medidas aplicadas nos municípios em situação irregular, conseguiu após 3 anos de programa modificar a situação verificando a disposição adequada em pouco mais de 95% do total dos municípios catarinenses (ABES/SC, 2006).

4.2 Aterro Sanitário

Segundo a NBR 8419 (ABNT, 1992, p.1), aterro sanitário é uma técnica de disposição dos resíduos sólidos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

A técnica de destinação definida como aterro sanitário pode ser entendido, de acordo com Castilhos Jr. e Reichert (2007), como um reator bioquímico, em que as principais entradas são os resíduos sólidos e água de chuva. Já as principais saídas são o biogás e o lixiviado gerados na degradação dos resíduos, de modo que permanece no “reator” a matéria orgânica parcialmente biodegradada e os materiais inorgânicos dispostos inicialmente.

Teixeira (2000) considera que um aterro sanitário deverá apresentar os seguintes elementos de projeto para proteção ambiental: impermeabilização de fundo e das laterais, drenagem e tratamento do lixiviado, drenagem e tratamento dos gases, drenagem de águas pluviais, compactação e cobertura diária dos resíduos. A Figura 4.2 apresenta um esquema de um aterro sanitário com os diversos sistemas de controle ambiental e as etapas de operação.



Fonte: D'Almeida e Vilhena 2000

Figura 4.2 – Detalhes de um aterro

As etapas básicas de operação são a chegada, pesagem e descarregamento do resíduo na frente de descarga, seguida da compactação e da cobertura do depositado, preparando assim, o terreno para recebimento de uma nova camada de resíduos até que se atinja a cota final de projeto.

O local de instalação de um aterro também deve ser cuidadosamente escolhido devido aos seus inconvenientes operacionais como mau cheiro, tráfego de caminhões de resíduos, mau aspecto, etc. Assim, este deve ser afastado das concentrações urbanas.

Maciel (2003) avalia que a operação do aterro também influencia os processos de decomposição dos resíduos. A redução do volume do resíduo por compactação e a utilização de pequenas áreas para um rápido fechamento das células, encurtam o processo aeróbio. A compactação do resíduo apresenta outra vantagem, uma vez que quanto maior a densidade alcançada, mais acentuada é a produção de gás por unidade de volume.

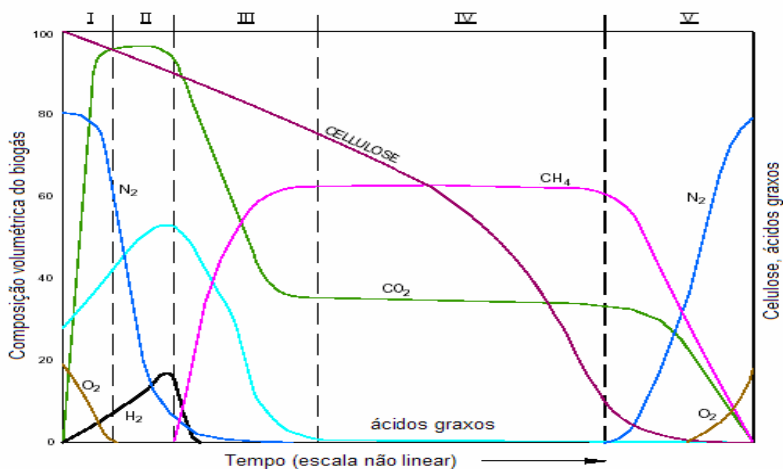
4.3 Geração de Biogás em Aterro Sanitário

4.3.1 Fases de Degradação de Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro Sanitário

A decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos gera o biogás, devido a mudanças bioquímicas que ocorrem. Por serem formados em sua grande parte de matéria orgânica, as frações inorgânicas e as dificilmente degradáveis dos resíduos, não são levadas em consideração nestas estimativas.

A matéria orgânica é degradada através de uma série de operações consecutivas, sendo primeiramente transformada em vários produtos intermediários como ácidos orgânicos voláteis (AOV), álcool e posteriormente transformada em biogás (PARK et al., 2001). Esse processo acontece em vários estágios devido à presença de bactérias que se alimentam de matéria orgânica transformando-a em compostos mais simples.

A formação e a taxa de geração dos principais constituintes do biogás variam ao longo do tempo e segue várias fases distintas que podem ser vistas na Figura 4.3 a seguir.



Fonte: MCBEAN (1995)

Figura 4.3 - Análise qualitativa da geração dos principais compostos ao longo das fases de degradação de um aterro sanitário

No início da Fase I, fase aeróbia, o ar atmosférico é predominante na massa de resíduo. À medida que o O_2 vai sendo consumido pelas bactérias aeróbias, o CO_2 começa a ser gerado. Nas fases II e III, fases ácidas, a concentração de CO_2 representa a maior parte dos gases gerados no aterro devido aos processos acidogênicos e acetogênicos que resultam na formação de CO_2 e H_2 . No final da Fase III, metanogênica instável, a população das bactérias metanogênicas começa a crescer, caracterizando o início da geração de CH_4 . O biogás é gerado na fase metanogênica, fase IV, sendo composto basicamente pelo CH_4 e CO_2 , numa proporção de 45-60% e 55-40%, respectivamente. Ao final da degradação dos resíduos orgânicos, fase V, a concentração destes gases tende a cair.

A partir deste estudo, a Tabela 4.3 a seguir especifica o tempo de abrangência de cada fase de degradação dos resíduos sólidos num aterro, bem como as condições as quais ele se encontra.

Tabela 4.3 – Fases de degradação dos resíduos em um aterro sanitário e tempo de abrangência

Fases	Condição	Período Típico
I	Aeróbia	horas a 1 semana
II	Anóxica	3 meses a 3 anos
III	Anaeróbia, metanogênica, instável	8 a 40 anos
IV	Anaeróbia, metanogênica, estável	1 a 40 anos
V	Anaeróbia, metanogênica, declinante	10 a 80 anos

Fonte: ESMAP (2004)

4.3.2 Fatores de influência

Segundo a USEPA (United States Environment Protection Agency), existem diversos fatores que influenciam a taxa de geração de gases de aterro. Os fatores mais comuns são a composição, a umidade e a idade do lixo, bem como a temperatura e o pH do aterro.

Além das condicionantes citadas anteriormente, outros aspectos como a geometria e operação do aterro e o ambiente externo à célula também são fatores determinantes na geração de gases (Maciel, 2003).

Tabela 4.4 - Principais fatores que afetam a produção de biogás em aterros sanitários

FATORES	CARACTERÍSTICAS
Geometria e Operação do aterro	Dimensão do aterro
	Impermeabilização
	Compactação do resíduo
Características iniciais dos resíduos	Composição do resíduo
	Umidade do resíduo
Ambiente Interno	Umidade da massa na degradação
	pH nas células
	Temperatura
	Disponibilidade de bactérias
	Presença de agentes inibidores
Ambiente Externo	Precipitação e infiltração
	Variação de pressão atmosférica
	Temperatura
	Evapotranspiração
	Umidade relativa do ar

Fonte: Maciel (2003)

4.3.2.1 Geometria e operação do aterro

As principais características da geometria do aterro para otimizar a geração dos gases são: a altura da massa de resíduo e o sistema de impermeabilização da célula. Segundo Maciel (2003), os processos anaeróbios dominam, normalmente, em massa de resíduo com profundidade maior que 5 m. O sistema de impermeabilização da célula, por sua vez, atua reduzindo os efeitos das condições atmosféricas na massa de resíduo.

4.3.2.2 Características Iniciais dos Resíduos

A composição e umidade dos resíduos na chegada ao aterro são fatores importantíssimos na avaliação da geração dos gases. A disponibilidade de frações mais facilmente degradáveis, como carboidratos, proteínas e lipídios, significam uma maior quantidade de substrato para a atuação de microrganismos. Desta forma, os resíduos com grande presença de matéria orgânica devem apresentar um maior potencial de produção de gases.

De acordo com EL-FADEL et al. (1997) e PALMISANO e BARLAZ (1996), a umidade da massa de resíduo é o principal

fator que influencia a geração de gases nos aterros. Desta forma, a umidade de chegada dos resíduos é também muito importante, pois é esta que determinará a umidade inicial da massa de resíduos imediatamente após a conclusão do aterro.

4.3.2.3 Aspectos do ambiente interno à célula

A Tabela 4.5 mostra os principais parâmetros relacionados com o ambiente interno da célula e sua influência na produção de biogás.

As características do ambiente interno à célula estão associadas à capacidade de favorecimento ou inibição das atividades bacterianas.

Tabela 4.5 - Parâmetros do ambiente interno e suas implicações na geração do biogás

<i>Fatores do ambiente interno</i>	<i>Implicação na produção do biogás</i>
Umidade da massa	Aumento da geração de biogás em umidades variando de 50 – 60%
pH	Maximização de produção de CH ₄ em pH neutro (6,8 a 7,4)
Temperatura	Temperatura ótima para produção de biogás entre 35 a 45°C
Disponibilidade de nutrientes e bactérias	Favorecimento com excesso de nutrientes (nitrogênio, fósforo e traços). Presença de bactérias metanogênicas e acetogênicas aumenta a produção de biogás.
Agentes inibidores	Metais pesados e ácidos em excesso inibem a produção de gases

Fonte: Maciel (2003)

4.3.2.4 Aspectos do ambiente externo à célula

A variação das condições externas provoca mudanças no ambiente interno do aterro. Essas alterações são ocasionadas principalmente pela entrada de oxigênio para o interior da massa de resíduo e secundariamente por variações de temperatura. O

ingresso de oxigênio ocorre tanto na forma dissolvida, por meio de águas pluviais que infiltram pelas camadas argilosas, quanto na forma gasosa devido ao aumento da pressão atmosférica local. Neste último caso, o oxigênio presente na atmosfera infiltra pelo sistema de cobertura uma vez que a permeabilidade das argilas aos gases é elevada (DUARTE, 2006).

O grau de influência da temperatura irá depender do gradiente existente entre a temperatura ambiente e a temperatura da massa de resíduo nas diferentes épocas do ano. Em aterros de regiões de clima tropical, onde o gradiente de temperatura é reduzido e varia muito pouco ao longo do ano, o efeito da temperatura é visto apenas nos primeiros metros (ENSINAS, 2003).

O potencial de influência de cada fator no favorecimento ou inibição das atividades bacterianas é de grande importância para o entendimento do comportamento da geração de gases nos aterros, como pode ser visto na Tabela 4.6 abaixo.

Tabela 4.6 - Potencial de influência dos principais parâmetros na geração de gases

Parâmetros	POTENCIAL DE FAVORECIMENTO
Composição do Resíduo	Médio
Tamanho das Partículas	Baixo
Temperatura	Baixo
pH	Médio
Nutrientes	Baixo
Bactérias	Baixo
Umidade	Alto
Hidrogênio	Baixo
POTENCIAL DE INIBIÇÃO	
Oxigênio	Alto
Sulfato	Baixo
Tóxicos	Médio
Metais	Baixo

Fonte: El Fadel et al. (1997)

4.3.3 Estimativa teórica de Geração de Biogás

Os modelos matemáticos são ferramentas úteis e econômicas para avaliar o potencial de geração de gás em um

aterro, pois seus resultados podem ser utilizados na avaliação do potencial de emissões e da viabilidade de projetos de gestão do gás (ESMAP, 2004). Castilhos JR. et al. (2003) concordam ao afirmar que a previsão da geração de biogás é de fundamental importância para estimar o balanço energético e econômico de instalações de recuperação de gás, e afirmam que diferentes métodos são utilizados para esta previsão, como os métodos estequiométricos e modelos matemáticos.

A metodologia de estimativa de geração de metano apresentada pela USEPA (1991), utiliza equações cinéticas de primeira ordem, considerando os seguintes parâmetros de entrada:

- Massa de resíduos depositada anualmente no aterro;
- Tempo de atividade do aterro e/ou após o fechamento;
- Taxa de geração de metano (k);
- Potencial de geração de metano (L_0).

O potencial de geração de metano (L_0) irá depender da composição dos resíduos e das condições do aterro para o processo de decomposição (USEPA, 1991). Quanto maior a quantidade de material orgânico presente na massa de resíduos, maior será o valor de L_0 (ESMAP, 2004). Na Tabela 4.7 podem ser visualizados os valores máximos e mínimos sugeridos por ESMAP (2004) a partir do tipo de resíduo, sendo que o mesmo sugere o valor de 170 m³ de CH₄ /t de resíduos.

Tabela 4.7 - Valores sugerido para L_0

Categorização do resíduo	Valor Mínimo (m ³ CH ₄ /t)	Valor Máximo (m ³ CH ₄ /t)
Relativamente inerte	5	25
Moderadamente degradável	140	200
Altamente degradável	225	300

Fonte: ESMAP (2004)

A taxa de geração de metano (k) está relacionada com o tempo de geração do biogás, e é influenciada pelo teor de umidade, composição dos resíduos, pH, temperatura e disponibilidade de nutrientes para o processo anaeróbico (ESMAP, 2004). Os valores sugeridos para k em função da precipitação anual estão apresentados na Tabela 4.8 a seguir.

Tabela 4.8 - Valores de k (ano⁻¹), em função da precipitação

Precipitação anual (P, em mm)	Material relativamente inerte	Material moderadamente degradável	Material altamente degradável
< 250	0,01	0,02	0,03
250 < P < 500	0,01	0,03	0,05
500 < P < 1000	0,02	0,05	0,08
> 1000	0,02	0,06	0,09

4.3.4 Composição do Biogás de Aterro

O biogás de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos é composto por vários gases, sendo o gás metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂) seus principais constituintes. Porém, segundo Brito Filho (2005), o biogás apresenta também concentrações residuais de compostos orgânicos voláteis (COV), poluentes aéreos perigosos (PAP) e outros elementos, que apesar de se encontrarem presentes em pequenas quantidades não devem ser desprezados, de maneira que podem ser tóxicos e apresentarem riscos à saúde pública. A Tabela 4.9 abaixo apresenta os valores típicos da composição do biogás.

Tabela 4.9 - Características dos principais gases presentes no gás de aterro

Gás	Concentração Típica	Densidade (kg/m ³)	Potencial Calorífico (kJ/m ³)	Solubilidade em água (g/l)	Propriedades Gerais
CH ₄	45-60%	0,717	35600	0,0645	Inodor, incolor, asfixiante, inflamável
CO ₂	35-50%	1,977	-	1,688	Inodor, incolor, asfixiante
N ₂	0-10%	1,25	-	0,019	Inodor, incolor
O ₂	1-4%	1,429	-	0,043	Inodor, incolor
CO	< 0,1%	1,25	12640	0,028	Inodor, incolor, tóxico, inflamável
H ₂	< 0,1%	0,09	10760	0,001	Inodor, incolor, inflamável
H ₂ S	0-70 ppm	1,539	-	3,846	Incolor, tóxico

Fonte: Maciel (2003)

4.3.5 Captação do biogás

O princípio operacional do sistema de coleta do biogás é bastante simples, consistindo na instalação de tubos de captação quando o resíduo ainda está sendo depositado no aterro. Desta forma o gás poderá ser extraído mais facilmente desde o início da sua produção, uma vez que o mesmo pode ser retirado antes do aterro ser coberto (OLIVEIRA, 2000).

Existem dois tipos básicos de sistemas de coleta: passivo e ativo. O sistema passivo tem a finalidade de drenar os gases para a atmosfera evitando a emissão descontrolada pela superfície, além de impedir que haja migração dos gases para as áreas vizinhas ao aterro através do solo, evitando potencial risco de explosão. O sistema ativo inclui exaustores e compressores e é usado em projetos de aproveitamento energético do biogás.

Segundo o IPCC (1996) não é possível coletar a totalidade do biogás produzido em um aterro, principalmente em função das características construtivas, impermeabilizações e métodos de disposição dos resíduos. Assim quanto maior for a possibilidade de escape do biogás fora do sistema de drenagem dos gases (ex: fissuras no solo, cobertura de solo inadequada, impermeabilização e drenos não conformes), menor será a capacidade de coleta do biogás gerado.

Os projetos de recuperação do biogás de aterro têm como finalidade principal o aproveitamento da energia contida nesse produto da decomposição do lixo. Antes de sua utilização, o biogás passa por uma fase de tratamento. Nesta fase, são removidos particulados, impurezas e o condensado presente no gás. Este tratamento depende da finalidade de uso do biogás.

4.3.6 Aproveitamento do biogás

4.3.6.1 Projetos MDL

Em dezembro de 1997, a COP-3 (Conferência das Partes III) se reuniu pela terceira vez, em Quioto, Japão, onde estiveram presentes cerca de 10.000 participantes. O objetivo principal da reunião era de adotar, entre outras medidas importantes, um possível Protocolo, ou instrumento jurídico equivalente, contendo obrigações mais rigorosas para o engajamento dos países

desenvolvidos no esforço às causas da mudança do clima resultantes da ação humana.

Ao final desse evento redigiu-se o Protocolo de Quioto, segundo o qual os países pertencentes ao Anexo I (países desenvolvidos) reduziriam suas emissões combinadas de GEE em 5,2%, em média, sobre os valores registrados nos períodos de 2008 a 2012 (UNFCCC, 2006, *apud* Duarte, 2006). Esse compromisso, com vinculação legal, prometeria que tais partes deveriam, individual ou conjuntamente, assegurar que suas emissões antrópicas, agregadas em equivalentes de CO₂ dos GEE, não excedessem as quantidades atribuídas pelo Protocolo de Quioto, calculadas em conformidade com sua limitação quantificada de emissões e compromissos de redução.

Em março de 2001, os Estados Unidos declararam oposição ao protocolo alegando que a redução nas emissões comprometeria o desenvolvimento do país e declarando-o falho por isentar os países em desenvolvimento da redução ou limitação de emissão de gases. O tratado entrou em vigor no dia 16 de fevereiro de 2005, após diversos impasses, mais precisamente, após a ratificação da Rússia no dia 18 de novembro de 2004.

Na Tabela 4.10 estão discriminadas as metas de redução de emissão de CO₂ dos países integrantes do Anexo I do Protocolo de Quioto.

Tabela 4.10 - Metas de redução de emissão de CO₂ dos países do Anexo I do Protocolo de Quioto

Países Integrantes do Anexo I do Protocolo de Quioto	Metas emissão de CO ₂
Áustria, Bélgica, Bulgária, República Tcheca, Dinamarca, Estônia, Comunidade Européia, França, Alemanha, Grécia, Itália, Liechtenstein, Lituânia, Luxemburgo, Mônaco, Finlândia, Portugal, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Países Baixos, Irlanda, Romênia, Suécia, Suíça, Letônia, Reino Unido da Grã Bretanha e Irlanda do Norte	-8%
Estados Unidos*	-7%
Canadá, Hungria, Japão, Polônia	-6%
Croácia	-5%
Nova Zelândia, Federação Russa, Ucrânia	0%
Noruega	1%
Austrália	8%
Islândia	10%

*País que ratificou o protocolo de Quioto

Com o intuito de facilitar o cumprimento dos compromissos assumidos pelos os países do Anexo I, foram criados mecanismos de implementação cooperativa, denominados de mecanismos de flexibilização. O princípio teórico destes mecanismos é o da eficiência econômica, de minimizar os custos de redução das emissões destes países, sem alterar a eficiência ambiental do Tratado de Quioto.

Dentre os mecanismos de flexibilização estão os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo. Está previsto no artigo 12º do tratado, sendo o único mecanismo que permite participação dos países emergentes. Com base neste artigo, os países em desenvolvimento poderiam se beneficiar de investimentos oriundos de países do Anexo I para a implantação de projetos de controle de emissões e o desenvolvimento sustentável, os quais dão origem aos Créditos de Carbono.

O MDL permite a certificação de projetos de redução de emissões nos países em Desenvolvimento e a posterior venda das reduções certificadas de emissões - RCEs, para serem utilizadas pelos países desenvolvidos como modo suplementar para cumprirem suas metas. Para que um projeto resulte em reduções

certificadas de emissões – RCEs, as atividades de projeto do MDL devem, necessariamente, passar pelas etapas do ciclo do projeto, que são sete (CQNUMC, 2010):

- Elaboração de documento de concepção de projeto (DCP), usando metodologia de linha de base e plano de monitoramento aprovados;
- Validação (verifica se o projeto está em conformidade com a regulamentação do Protocolo de Quioto);
- Aprovação pela Autoridade Nacional Designada – AND, que no caso do Brasil é a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima – CIMGC (verifica a Contribuição do projeto para o desenvolvimento sustentável);
- Submissão ao Conselho Executivo para registro;
- Monitoramento;
- Verificação/certificação;
- Emissão de unidades segundo o acordo de projeto.

Ao completar o ciclo de validação, aprovação e registro, a atividade registrada torna-se efetivamente uma atividade de projeto no âmbito do MDL. A Figura 4.4 mostra o status atual das atividades de projeto em estágio de validação, aprovação e registro no mundo. Um total de 5897 projetos encontrava-se em alguma fase do ciclo de projetos do MDL, sendo 2.067 já registrados pelo Conselho Executivo do MDL e 3.830 em outras fases do ciclo. Como pode ser verificado na figura, o Brasil ocupa o 3º lugar em número de atividades de projeto, com 440 projetos (7%), sendo que em primeiro lugar encontra-se a China com 2197 (37%) e, em segundo, a Índia com 1575 projetos (27%).

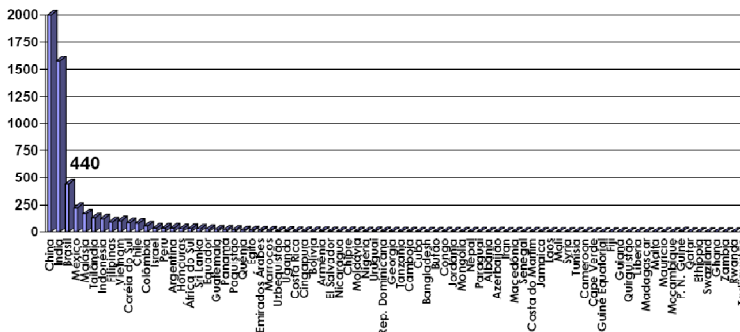


Figura 4.4 - Número de Atividades de Projeto no Âmbito do MDL no mundo

É nesse contexto que se insere o aproveitamento do biogás proveniente de aterros sanitários. Em aterros convencionais o biogás é emitido para a atmosfera e torna-se um dos principais responsáveis pelo efeito estufa. Com a implantação de um projeto de MDL, o biogás é coletado, tratado, queimado ou reaproveitado como insumo energético. No final do processo, o CH₄ torna-se 21 vezes menos impactante, pois é transformado em CO₂. Segundo o Protocolo, aterros sanitários que tratem seus gases, tanto pela queima quanto pelo aproveitamento da energia serão remunerados pela venda de créditos de carbono.

Com base nos dados do CQNUMC (2010), os aterros sanitários representam 8,2% das atividades de projeto de MDL por escopo setorial no Brasil. A predominância das atividades se encontra no setor de energias renováveis. A Figura 4.5, abaixo, representa estes dados.

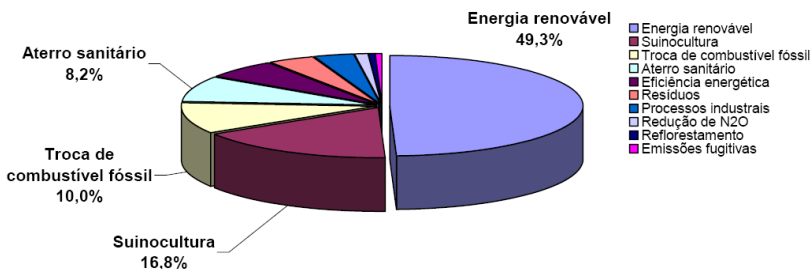


Figura 4.5 - Número de Projetos Brasileiros por Escopo Setorial

4.3.6.2 Produção de energia através do biogás

Segundo Costa (2002), a conversão energética do biogás pode ser apresentada como uma medida compensatória para o grande volume de resíduos produzidos em aterros sanitários, visto que reduz o potencial tóxico das emissões de metano ao mesmo tempo em que produz energia elétrica, agregando, desta forma, ganho ambiental e redução de custos.

Neste mesmo contexto, a crise de energia elétrica existente hoje no Brasil, torna a necessidade de diversificar as fontes de energia eminente. Assim, mecanismos legais vêm sendo criados para regulamentar o uso destas fontes, tal como a lei que cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, conhecido como PROINFA. Este programa tem como objetivos: incentivar a geração de energia elétrica a partir da energia eólica, da biomassa (entre elas o biogás dos resíduos sólidos) e de pequenas centrais hidroelétricas, diversificar a matriz energética do país e dar maior confiabilidade e segurança ao abastecimento elétrico.

Segundo o Balanço Energético Nacional (2003), mais de 70 % da matriz energética do Brasil é renovável, enquanto a média mundial não chega a 14 %. No entanto, 90% da energia elétrica renovável do país é gerada em grandes usinas hidrelétricas, o que provoca grande impacto ambiental e social. Atualmente a energia hidrelétrica é considerada uma fonte de energia renovável, porém não se descarta o imenso impacto causado na fauna, flora e, não menos importante, nas comunidades locais que habitavam locais, hoje, alagados.

Assim, as fontes alternativas de energia como eólica, solar e biomassa, além de causarem impactos ambientais menores, evitam a emissão de toneladas de gás carbônico na atmosfera. Dentre as fontes alternativas citadas, enquadra-se a utilização do biogás proveniente da decomposição dos resíduos sólidos urbanos como uma fonte alternativa de biomassa.

A utilização do biogás se dá de diferentes formas como: a geração de calor, trabalho mecânico e eletricidade, utilizando-se caldeiras, motores de combustão interna, turbinas a gás, células combustíveis entre outros conversores de energia.

O uso direto do biogás pode ser realizado para abastecimento de uma rede local de gás canalizado ou diretamente para alguma aplicação específica em processos industriais. Castilhos Jr. et al. (2003) considera que os possíveis

usos para o biogás de aterros sanitários dependerão de características de produção como vazão, pressão, PCI (poder calorífico inferior) e regularidade, e ainda pelas condições impostas pelo utilitário desses gases. Os autores destacam a importância da distância entre o local de produção e o de utilização, a qual deverá ser a menor possível.

5 METODOLOGIA

5.1 Local de Estudo

O presente estudo foi desenvolvido no Aterro Sanitário de Canhanduba, localizado na cidade de Itajaí, estado de Santa Catarina – Brasil. Localiza-se nas coordenadas 728173.76m E e 7013853.09m S, de acordo com o sistema métrico Universal Transversa de Mercator - UTM. A Figura 5.1 a seguir, representa o mapa de localização do município, e indicação de onde se encontra o aterro em estudo.



Figura 5.1 - Mapa de localização do município de Itajaí
Fonte: Epagri/ SC adaptado pela autora

A Figura 5.2 mostra um mapa elaborado a partir de foto de satélite adquirido do software Google de agosto de 2009 e modificado pela autora, o qual ainda se apresenta em fase de preparação da base com material impermeabilizante, a manta de Polietileno de Alta Densidade (PEAD). A sudeste do local de estudo, observa-se a área do antigo lixão. Os drenos de biogás ilustrados foram plotados através de georreferenciamento adquirido em visita a campo com aparelho GPS, da marca Garmin, modelo eTrex.



Figura 5.2 – Foto de satélite do aterro de Canhanduba modificado pela autora com os drenos de estudo plotados.

Fonte: Google Earth – georreferenciado pela autora através de aparelho GPS

A AMBSC também possui plantas de monitoramento mensal do aterro, a qual pode ser observada na Figura 5.3. A planta, referente ao mês de maio de 2010, foi modificada pela autora para uma melhor visualização dos drenos em estudo, com relação às diferenças de altura os quais se encontram. Esta diferença de alturas foi ilustrada anteriormente na Figura 5.2 através de cores que se diferenciavam entre si de acordo com a altura o dreno se encontra.

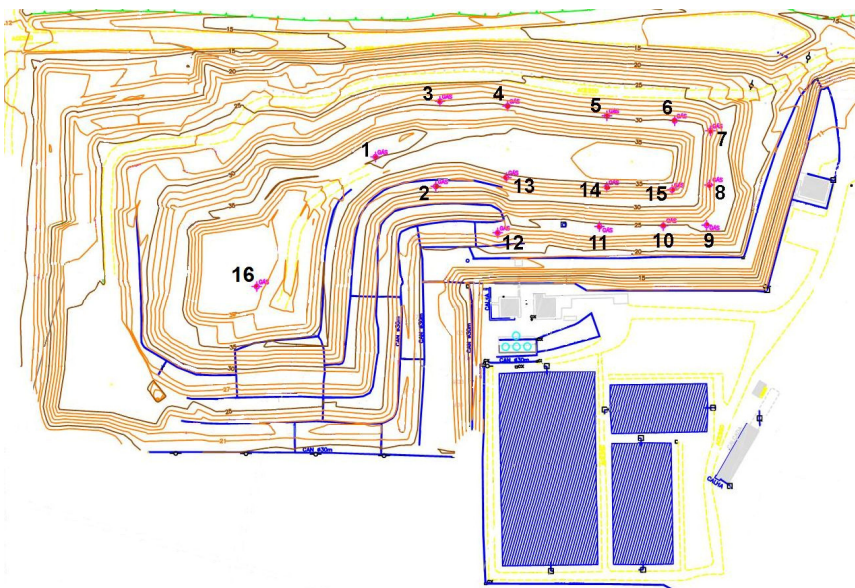


Figura 5.3 - Pontos de monitoramento do Aterro adaptada pela autora.

Fonte: AMBSC, 2010

5.1.1 Características do Aterro

Segundo Francisco (2009) *apud* Formighieri (2007), a área onde foi implantado o Aterro Sanitário de Canhanduba era inicialmente formada por vegetação em estágio médio de regeneração, vegetação de capoeirão, com sub-bosque dominado por bambus e samambaias. O bosque encontrava-se completamente pisoteado, resultado da constante entrada e circulação de animais domésticos, principalmente, gado bovino. O desmatamento foi realizado de maneira a evitar ilhas onde animais ficassem isolados.

A empresa gestora, AMBSC, mantém o controle mensal de recebimento de resíduos no aterro sanitário, o qual pode ser observado na Tabela 5.1 a seguir. Ele foi implantado na área do antigo lixão da cidade de Itajaí, e recebe atualmente resíduos das cidades de Itajaí e Balneário Camboriú. A empresa assumiu o controle do antigo lixão em 2003, e recuperou a área com técnicas de engenharia, transformando o antigo depósito em aterro sanitário. Os dados de deposição de resíduos datam de

2006, visto que este é o ano em que se iniciaram as atividades na nova etapa do aterro, local onde foram realizadas as medições, e também para o qual foi estimada a produção de biogás. Vale ressaltar que a vida útil do aterro é de 23 anos.

Tabela 5.1 – Histórico de deposição de resíduos

Mês/ Ano	Cidade		Total (ton)	Mês/ Ano	Cidade		Total (ton)
	Itajaí	BC			Itajaí	BC	
jul/06	2.134,5	1.466,0	3.600,5	jun/08	3.799,9	2.936,0	6.735,9
ago/06	4.395,0	2.871,0	7.266,0	jul/08	4.077,7	3.474,0	7.551,7
set/06	4.010,0	2.976,0	6.986,0	ago/08	4.229,6	3.180,0	7.409,6
out/06	4.308,0	3.380,0	7.688,0	set/08	4.020,7	3.281,0	7.301,7
nov/06	4.294,0	3.481,0	7.775,0	out/08	4.450,6	3.505,0	7.955,6
dez/06	4.627,0	4.609,0	9.236,0	nov/08	4.828,2	3.979,0	8.807,2
jan/07	4.788,0	6.109,0	10.897,0	dez/08	6.593,3	5.097,0	11.690,3
fev/07	4.729,0	4.442,0	9.171,0	jan/09	4.660,0	6.274,0	10.934,0
mar/07	5.053,0	4.190,0	9.243,0	fev/09	6.038,4	5.083,0	11.121,4
abr/07	5.008,0	3.651,0	8.659,0	mar/09	5.852,1	4.708,0	10.560,1
mai/07	4.524,0	3.304,0	7.828,0	abr/09	4.816,7	3.851,0	8.667,7
jun/07	4.154,0	3.074,0	7.228,0	mai/09	4.289,9	3.365,0	7.654,9
jul/07	4.145,0	3.036,0	7.181,0	jun/09	4.380,9	3.294,0	7.674,9
ago/07	4.020,0	3.034,0	7.054,0	jul/09	4.538,6	3.548,0	8.086,6
set/07	4.289,0	3.179,0	7.468,0	ago/09	4.595,3	3.621,0	8.216,3
out/07	4.583,0	3.635,0	8.218,0	set/09	4.822,0	3.872,0	8.694,0
nov/07	4.248,0	3.624,0	7.872,0	out/09	4.880,4	3.902,0	8.782,4
dez/07	4.506,0	4.882,0	9.388,0	nov/09	4.738,6	3.980,0	8.718,6
jan/08	3.326,0	5.941,0	9.267,0	dez/09	5.110,0	5.449,0	10.559,0
fev/08	4.364,9	4.746,0	9.110,9	jan/10	5.008,1	6.433,0	11.441,1
mar/08	4.338,0	4.270,0	8.608,0	fev/10	4.706,6	5.059,8	9.766,4
abr/08	4.177,0	3.712,0	7.889,0	mar/10	4.972,7	4.406,2	9.378,9
mai/08	4.092,5	3.321,0	7.413,5	abr/10	4.609,6	3.829,7	8.439,3
TOTAL				391.194,4			

5.2 Estimativa Teórica do Biogás

5.2.1 Levantamento de dados preliminares

O levantamento de dados preliminares foi realizado com o auxílio da própria empresa responsável pelo gerenciamento do aterro sanitário estudado. Os dados iniciais necessários para ser compilada a estimativa teórica de produção de biogás, são basicamente, os seguintes:

- Ano de Abertura e Fechamento do Aterro (Vida Útil do Aterro);
- Quantidade de Resíduos Disposta por Mês (Histórico do Aterro);
- Geração per capita e/ou Crescimento Populacional (Estimativa de deposição futura);
- Dados climáticos do local (índice de pluviosidade médio anual);

O dado referente ao crescimento populacional foi obtido com dados da Prefeitura Municipal de Itajaí (PMI) no site do mesmo, enquanto os dados do índice pluviométrico foram compilados através da série histórica, obtida no site da Agência Nacional das Águas (ANA) através do portal HidroWeb, do município de Itajaí, no qual indica que a estação mais próxima ao aterro, localiza-se em Itajaí e é de responsabilidade e operada pela EPAGRI. Com os dados da série histórica encontrou-se a média anual de chuvas para a região.

5.2.2 Curva de produção de biogás

Para a construção da curva de geração de biogás ao longo dos anos utilizou-se como ferramenta de pesquisa o programa Excel. Adotou-se como base o método proposto pela USEPA (1991) denominado “Decaimento de Primeira Ordem”. Este método de previsão da geração de biogás considera que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo, e é definido segundo a equação a seguir.

$$Q_{CH_4} = L_0 \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt})$$

Em que:

- Q é a geração de gás metano no ano, em m³/ano;
- L₀ é o potencial da geração de metano dos resíduos, em m³/t de resíduos;
- R é a taxa de deposição média anual de resíduo durante a vida útil do aterro, em t/ano;
- k é a constante de decaimento, em ano;
- c é o tempo desde o fechamento do aterro (anos), sendo c igual a 0 para aterros ativos;
- t é o tempo desde o início de deposição do resíduo (anos).

Na equação, enquanto o aterro recebe resíduo, a variável c será zero, o termo e^{-kt} será 1 e o valor de R será a média de deposição de resíduo até o fechamento do aterro. Após o seu fechamento, o aterro continuará a gerar biogás e a variável c deverá ser considerada.

Assim, os valores de massa de resíduos depositados no aterro, após o ano de estudo, foram estimados considerando um aumento de 2,24% em relação ao ano anterior. Este valor foi estimado considerando a taxa de crescimento da população da cidade de Itajaí,.

Em relação à constante de decaimento (k) e ao potencial de geração de metano (L₀) foram adotados 3 cenários com valores distintos para o cálculo da estimativa teórica de produção de metano. No cenário inicial utilizaram-se os dados sugeridos pela USEPA (1991) e o segundo cenário recebeu os dados propostos por ESMAP (2004). No terceiro e último cenário os dados utilizados são referentes às condições climáticas locais e as características dos resíduos sólidos recebidos pelo aterro. As faixas de valores referentes ao cenário 3 são sugeridas por ESMAP (2004) e referem-se a um índice pluviométrico anual maior que 1000 mm e os resíduos moderadamente degradáveis. A Tabela 5.2 abaixo mostra os valores adotados para cada cenário.

Tabela 5.2 - Cenários propostos com diferentes valores para os coeficientes k e L_0

Cenários	Valores	
	k (ano ⁻¹)	L_0 (m ³ /ton)
1	0,04	100
2	0,06	170
3	0,06	180

Francisco (2009) justifica a escolha dos dados do terceiro cenário por meio dos dados obtidos junto às séries históricas de estações pluviométricas da cidade de Itajaí e também por meio de dados da Ciram/EPAGRI, que diagnosticou a precipitação média anual da cidade de Itajaí de 1700 mm. O estudo da composição gravimétrica do aterro sanitário de Canhanduba aponta proporções de material altamente biodegradável, matéria orgânica, papel e papelão, na ordem de 37,27, 8,24 e 4,76 respectivamente. Resultando em um total de 50,27% valor este inferior que a maioria das cidades listadas na Tabela 4.2. no item 4.1.2.

Considerou-se que os drenos de biogás do aterro em estudo coletam 75% das emissões de gases, valor este proposto Abreu et al. (2006). Este, afirma que o restante dos gases é perdido por emissões fugitivas na camada de cobertura e falha na vedação nos drenos.

5.3 Levantamento de Dados em Campo

As medições em campo foram feitas com os mesmos aparelhos adotados por Francisco (2009) para que não houvesse diferenças nos dados ao se adotar aparelhos diferentes.

Sendo assim, no aterro foram adotados alguns procedimentos para minimizar os erros na obtenção dos dados em campo. Os erros poderiam ser agravados pela velocidade do vento, no caso da obtenção do valor de velocidade de escoamento do gás pelo dreno, e pela má vedação do dreno, no caso de medição da concentração de gases presentes no biogás.

Para ambos os casos descritos os drenos foram isolados por uma lona plástica quadrada de aproximadamente 4,0m², a qual estava presa a uma tábua circular de madeira de diâmetro de

0,6m, com um orifício no centro de diâmetro 0,3m utilizado para a instalação do bocal. Os drenos presentes no aterro sanitário têm diâmetro interno de 0,4m e externo de 0,5m. Assim, a tábua de madeira era colocada sobre o dreno, onde então o bocal era acoplado ao centro desta e a medição podia ser feita naquele local.

Para tornar a seção conhecida, utilizou-se um bocal de vazão tipo β reduzido (Figura 5.4) seguindo as recomendações da *American Society of Mechanical Engineers* (DELMÉE, 1982). A peça moldada foi fixada em um tubo de PVC de 200 mm de diâmetro com parafusos nas laterais os quais servem para fixar o bocal nos drenos a serem estudados. Na saída do bocal, com diâmetro de 80 mm, foi feito um furo lateral de 12 mm de diâmetro para a introdução do aparelho utilizado para obtenção dos valores de velocidades e temperaturas de cada dreno. Nesta saída do bocal o perfil de velocidades é uniforme facilitando a obtenção da velocidade dos gases produzidos

Antes de dar início às medições, era necessário verificar se todos os drenos a serem analisados não apresentavam altas chamas provenientes da queima do biogás. Caso contrário, os drenos que se apresentavam desta forma, eram apagados com um extintor de incêndio do tipo pó químico. As medições contemplavam em geral 15 drenos, porém alguns deles apresentaram situações que não possibilitavam a medição, como em períodos de chuva em que o solo cedia e alguns drenos não suportavam a pressão do solo mole e tombavam, ou em alguns casos onde não foi possível apagar a chama do dreno devido à sua má impermeabilização junto ao solo, o que tornava impossível controlar o fogo. Enfim, o quadro variava entre os dias de medição.



Figura 5.4 – Foto ilustrativa do bocal reduzido utilizado para as medições

5.3.1 Determinação da Vazão do Biogás

Para a determinação da vazão do biogás foram realizadas medições de velocidade e temperatura provenientes de cada dreno, buscando assim determinar a vazão a partir de uma seção conhecida. Para a realização das medições, foi utilizado, conforme citado anteriormente, um equipamento de fibra de vidro visando à redução da área de passagem do biogás, com o intuito de aumentar sua velocidade de saída.

Os drenos foram envolvidos pela lona plástica e em seguida vedados por uma corda elástica, buscando impedir a penetração do ar externo e diminuir a fuga de biogás.

O aparelho utilizado foi o Termo-Anemômetro digital com sensor de fio quente compensado da marca *Dwyer*, modelo 471-2, mostrado na Figura 5.5 a seguir.



Figura 5.5 - Termoanemômetro 471-2 da Dwyer usado na medição da vazão do biogás nos drenos

Esse aparelho além de medir a velocidade do ar também fornece o valor da temperatura do ambiente.

Tabela 5.3 - Propriedades do Anemômetro		
Exatidão de medição da velocidade		
Escala	Temperatura ambiente	Erro
0 – 70 (m/s)	0 – 100 °C	± 1%

A vazão do biogás nos drenos será calculada através da equação:

$$Q = (V.A).\frac{273,15}{273,5 + T}.P$$

Fonte: (IUPAC)

Sendo:

Q: vazão do biogás (Nm^3/s)

V: velocidade de saída do biogás (m/s)

A: área da seção de passagem do fluido (m^2)

T: temperatura de saída do biogás ($^{\circ}\text{C}$)

P: pressão de saída do gás/ pressão atmosférica (atm)

5.3.2 Determinação da Concentração do Biogás

Para medir a qualidade do gás, foi usado o Analisador de Gás Dräger X-am 7000. O aparelho possui sensores que monitoram de forma confiável o metano (CH_4), por ser justamente o mais poluente e comburente, o dióxido de carbono (CO_2), que dá uma indicação dos processos de biológicos de decomposição, além do oxigênio (O_2), de amônia (NH_3) e do gás sulfídrico (H_2S).

A medição era feita substituindo-se o tubo de PVC usado para medir a vazão por um “cap” de PVC, que era igualmente acoplado ao bocal para evitar perda por escape dos gases, com um orifício no centro de aproximadamente 2cm. Neste orifício era acoplada a mangueira do aparelho Dräger, que fazia a sucção dos gases para o aparelho e realizada a medição. De acordo com as especificações técnicas do aparelho, esperava-se 5 minutos para que o aparelho se estabelecesse e realizasse as medições de concentração de gases presentes no biogás. A Figura 5.6, a seguir, ilustra o procedimento descrito.



Figura 5.6 – Foto ilustrativa da medição de vazão do biogás, com dreno vedado, bocal reduzido utilizando o aparelho drager.

A medição do gás dentro do aparelho é feita através de sensores, onde o biogás é bombeado para o aparelho, analisado e depois liberado.



Figura 5.7 - Aparelho Dräger X-am 7000 utilizado para monitorar a qualidade do biogás

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES\

6.1 Dados preliminares do aterro

Os resultados referentes ao levantamento dados são descritos na Tabela 6.1, a seguir. Os dados foram obtidos junto à empresa que gerencia o aterro sanitário, a Agência Nacional das Águas (ANA) e a Prefeitura Municipal de Itajaí (PMI).

Tabela 6.1 - Dados preliminares do aterro de Canhanduba

Média de deposição mensal relatada pela empresa	8.504,2	ton
Precipitação média anual na cidade de Itajaí	1700	mm
Ano de abertura do aterro	2006	
Ano de fechamento do aterro	2029	
Crescimento da população na cidade de Itajaí	2,24	%

A projeção de recebimento de resíduos até o ano de encerramento das atividades de deposição de resíduos no aterro sanitário de Canhanduba foi realizada com um incremento de 2,24% ao ano, e os resultados se encontram na Tabela 6.2, a seguir.

Tabela 6.2 - Projeção do recebimento de resíduos até o ano de fechamento do aterro, e o peso de resíduos acumulado

ANO	TOTAL (ton)	TOTAL Acumulado	ANO	TOTAL (ton)	TOTAL Acumulado
2006	42.551,5	42.551,5	2018	133.553,2	1.454.021,9
2007	100.207,0	142.758,5	2019	136.544,8	1.590.566,7
2008	99.740,4	242.498,9	2020	139.603,4	1.730.170,1
2009	109.669,9	352.168,8	2021	142.730,5	1.872.900,6
2010	111.863,3	464.032,1	2022	145.927,7	2.018.828,3
2011	114.369,0	578.401,1	2023	149.196,5	2.168.024,8
2012	116.930,9	695.332,0	2024	152.538,5	2.320.563,3
2013	119.550,2	814.882,2	2025	155.955,3	2.476.518,6
2014	122.228,1	937.110,3	2026	159.448,7	2.635.967,3
2015	124.966,0	1.062.076,3	2027	163.020,4	2.798.987,7
2016	127.765,2	1.189.841,5	2028	166.672,0	2.965.659,8
2017	130.627,2	1.320.468,7	2029	170.405,5	3.136.065,3

6.2 Estimativa teórica da produção de gases

Pela estimativa teórica observou-se o comportamento da produção de metano no Aterro Sanitário de Canhanduba desde o ano de abertura, 2006, até o ano de 2125. Os resultados formam a curva de produção de metano apresentada no Gráfico 6.1, na sequência

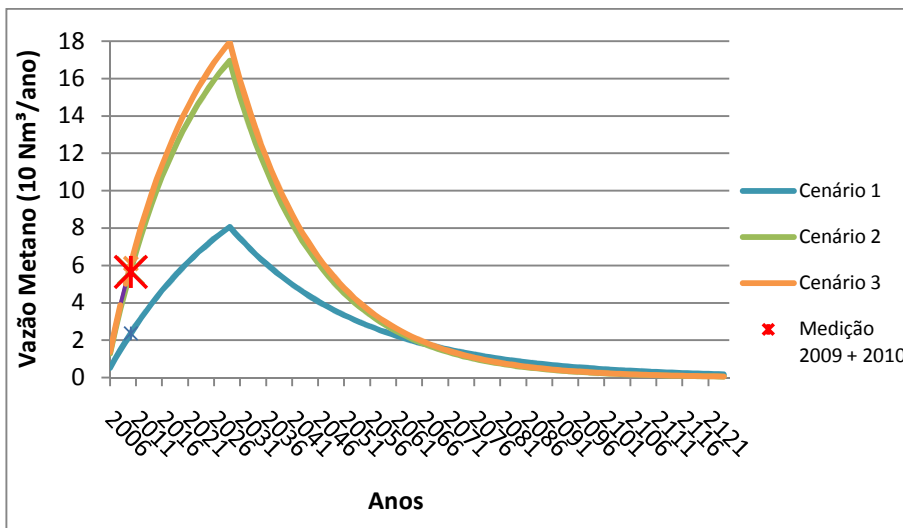


Gráfico 6.1 - Curva de geração de metano no aterro, de acordo com os diferentes cenários

De acordo com a Tabela 5.2, apresentada no capítulo 5, item 5.2.2, os dados propostos pela USEPA são próximos aos adotados pela autora, referentes a qualidade dos resíduos e condições climáticas locais. Assim explica Francisco (2009) a proximidade das curvas geradas pelo cenário 2 e 3. O valor encontrado na medição instantânea feita em campo, somadas ao valor encontrado por Francisco (2009), se aproxima do cenário 3, sempre considerando o acréscimo de 25% na medição já explicitado anteriormente no item 5.2.2.

6.3 Medições em campo dos gases produzidos nos drenos

Foram realizadas 10 campanhas para análise da vazão e concentração dos gases efluentes de 16 drenos situados no aterro sanitário. A ilustração de localização dos drenos foi observada anteriormente no item 5.1. A realização das medições não pode ser realizada em 100% das vezes, pois houve alguns problemas durante as campanhas, como por exemplo, drenos danificados pela ação prolongada do calor da queima do biogás, drenos em combustão, que não foi possível apagar a chama, e drenos que não apresentaram vazão de gás suficiente para que fossem realizadas as medições. De acordo com os dados coletados foi realizado o cálculo da vazão média de cada dreno, que resultou num valor de 442,06 Nm³/dia de biogás, totalizando uma vazão média de 7072,9 Nm³/dia, no total dos drenos novos medidos no aterro. Finalmente, adotando esta média diária estimou-se a contribuição dos drenos novos para o ano de 2010 uma produção de, aproximadamente, 2,6 milhões de Nm³ de biogás.

Após as medições de vazão do biogás foi realizada a caracterização dos gases em relação à porcentagem de concentração dos gases presentes no biogás. Como a pesquisa realizada por Francisco, M. Z. em 2009 focou no aproveitamento energético, o principal gás analisado no presente trabalho foi o metano (CH₄). A seguir, na Tabela 6.3 observa-se a ocorrência de medição nas faixas de valores escolhidas, totalizando os 16 drenos medidos. As faixas de valores foram escolhidas de acordo com a bibliografia, que descreve um valor máximo até 60%, e como valor ótimo para aproveitamento energético entre 40% e 60%. Já as demais faixas de valores foram criadas para agrupar os drenos menos favorecidos de metano.

Tabela 6.3 - Número de ocorrência das porcentagens de metano presente no biogás

Faixa de valores	Número de Ocorrência	Porcentagem
Acima de 60%	1	6,25%
de 40% - 60%	3	18,75%
de 20% a 40%	6	37,50%
de 10% a 20%	1	6,25%
de 0% a 10%	5	31,25%
Total de drenos medidos	16	100,00%

No caso das medições realizadas no presente trabalho, os drenos que apresentam valores ótimos ao aproveitamento energético, que neste caso representam 18,75% dos drenos, estão localizados no centro do local de estudo e também apresentam maior vazão de biogás. São os drenos de número 4, 5 e 13. Apesar de estarem na faixa de valores entre 20 e 40%, os drenos 1, 2 e 6 possuem valores admissíveis ao reaproveitamento energético, pois apresentam valores muito próximos ao máximo da faixa onde se encontram, além da alta vazão de biogás.

Os 5 drenos (31,25%) que apresentaram as medições mais baixas, ou seja, na faixa de valores entre 0 e 10%, podem ser justificados devido a sua localização. Eles estão representados pelos drenos de números 8, 9, 10, 11, e 12, os quais estão conectados diretamente ao tubo principal da drenagem do lixiviado que encaminha todo o líquido percolado daquele local para a estação de tratamento que se situa logo ao lado. Com isso, subentende-se que o metano gerado naquele local é drenado pelos outros drenos. Além disso, tais drenos apresentaram valores de Amônia (NH_3) altíssimos, os quais podem ser justificados, tanto pela possível entrada da amônia volatilizada no momento da medição, carregada das lagoas da estação através do ar, quanto pela amônia da própria tubulação principal de lixiviado que está conectada aos referidos drenos, conforme dito anteriormente.

As medidas referentes às vazões de biogás e de metano nos drenos enumerados de 1 a 16 são apresentadas a seguir na Tabela 6.4 e Tabela 6.5, nas quais pode-se observar as médias, os desvios padrão e valores máximos e mínimos para cada dreno. Os cálculos de vazão total foram obtidos com a soma das vazões de cada dreno observado. Os valores de vazão de metano foram obtidos pelo produto entre as concentrações de metano e os valores de vazão de biogás para cada dreno através da média ponderada. Os valores obtidos em cada dreno por observação em campo encontram-se nas tabelas de medição localizadas no Apêndice A.

Tabela 6.4 - Dados médios das medições de vazão do biogás produzido nos drenos

Vazão BIOGÁS (Nm³/dia)					
Dreno	n	Média	Desvio Padrão	Mínima	Máxima
1	10	891,60	351,81	677,98	1834,92
2	10	442,95	71,87	248,53	502,41
3	10	253,53	196,22	53,09	589,41
4	10	469,25	151,82	326,65	790,47
5	10	584,55	156,29	395,86	870,17
6	9	537,66	86,62	506,25	686,26
7	10	332,58	115,18	213,11	427,63
8	9	245,61	62,39	159,15	273,47
9	10	181,14	133,24	118,85	484,35
10	10	176,58	132,52	138,05	551,85
11	10	171,44	141,95	59,32	582,94
12	10	455,81	96,33	331,20	575,58
13	3	606,80	200,54	379,18	379,18
14	7	509,80	89,16	312,52	951,91
15	2	266,64	245,02	194,38	605,53
16	10	946,96	513,87	551,05	2422,07
TOTAL	10	7072,90	2744,84	4665,19	12528,15

Os drenos 13, 14, 15 não estavam aptos à realização das medições no início das campanhas, pois a célula em questão ainda estava em fase de conclusão, ou seja, ainda havia resíduos sólidos sendo depositados naquele local. Além disso, com relação ao dreno 15, após a realização de 2 medições, houve um período de chuvas intensas na região, na qual o solo cedeu e o dreno tombou, tornando-se inacessível à futuras medições. O mesmo ocorreu com o dreno 13, que tombou dias após o dreno 15, sendo então realizadas apenas 3 medições.

Os drenos 6 e 8, também apresentavam-se tombados no início das medições, porém foi requisitado a administração do aterro e estes foram logo recolocados em seus locais.

Tabela 6.5 - Dados médios das medições de vazão de metano produzido nos drenos

Vazão METANO (Nm³/dia)					
Dreno	n	Média	Desvio Padrão	Mínima	Máxima
1	10	342,98	141,13	218,58	733,97
2	10	173,84	25,93	104,38	200,97
3	10	61,16	49,41	14,07	147,35
4	10	246,36	81,79	86,97	426,86
5	10	292,96	83,00	146,41	443,79
6	9	212,62	65,57	139,70	329,40
7	10	94,47	30,07	33,03	140,43
8	9	22,10	11,60	3,38	41,12
9	10	3,36	2,95	0,48	8,72
10	10	2,39	2,24	0,72	8,83
11	10	2,26	2,98	0,59	11,08
12	10	33,98	6,43	22,77	41,99
13	3	220,31	29,72	185,80	216,78
14	7	148,09	39,13	109,38	237,98
15	2	65,82	29,86	35,96	95,67
16	10	645,30	325,59	374,71	1574,35
TOTAL	10	2568,01	927,40	1476,94	4659,27

Os drenos 1, 4, 5, 6 e 13, ou seja, os drenos que apresentaram valores ótimos ao aproveitamento energético, representam 58% da vazão média de biogás do local de estudo no aterro e 50% da vazão de metano. Destes drenos o que apresentou maior vazão de metano e biogás foi o dreno 1. O que apresentou menor vazão de metano, foi o dreno número 6, e com relação ao biogás, o dreno 4.

Agora considerando todos os drenos medidos no local, o número 16 apresentou maior vazão média de biogás, bem como, de metano. Entretanto, este não é responsável pela drenagem das células novas. Ele representa as medições feitas no local estudado no ano anterior. Sendo assim, o dreno que apresenta maior vazão média de biogás, bem como de metano, foi o dreno 1. Enquanto os drenos que apresentaram menor vazão de biogás e metano foi o dreno 11.

Os coeficientes de variação (razão entre o desvio e a média) apresentaram-se menores nas medições de metano quando comparados com as medições de biogás. Para a medição de vazão

média total de biogás o coeficiente de variação foi de 38,81% enquanto nas medidas de metano o coeficiente foi de 36,11%.

Quando analisados drenos a drenos, o coeficiente de variação apresentou um valor médio de 44,85% nos valores de vazão de biogás e 48,85% para os valores de vazão de metano. Este alto valor para as medidas de metano deve-se ao fato de que o dreno 11 apresentou coeficiente de variação de 131,67%. Uma variação deste porte se explica observando o alto valor de desvio padrão, o qual representa consequentemente o alto Grau de dispersão dos dados numéricos em torno do valor médio. O dreno 11 encontra-se num local periférico, drenando gases da tubulação principal do lixiviado que vai para a estação, que ora apresentava vazão, ora apresentava-se quase inativo.

As vazões totais de biogás e de metano obtidas nos 10 ensaios, seus valores médios e os seus intervalos inferiores e superiores com 99% de confiança são apresentados a seguir (Gráfico 6.2 e Gráfico 6.3). Para as amostragens realizadas, a média da extração de biogás do aterro sanitário de Canhanduba foi de 7.072,9 Nm³/dia com variação de 2.744,8 Nm³/dia. Já para a vazão de metano, obteve-se o valor médio de 2.568,01 Nm³ CH₄/dia com variação de 927,4 Nm³ CH₄/dia.

Gráfico 6.2 - Análise da média de biogás medido no aterro durante 10 campanhas

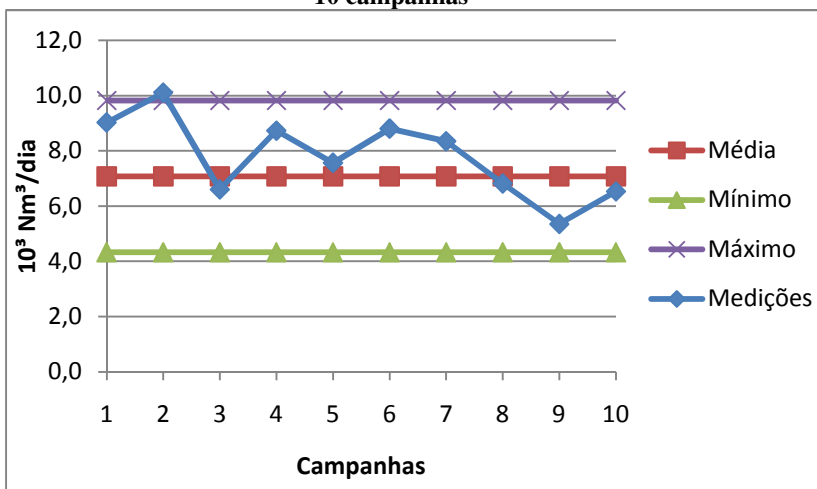
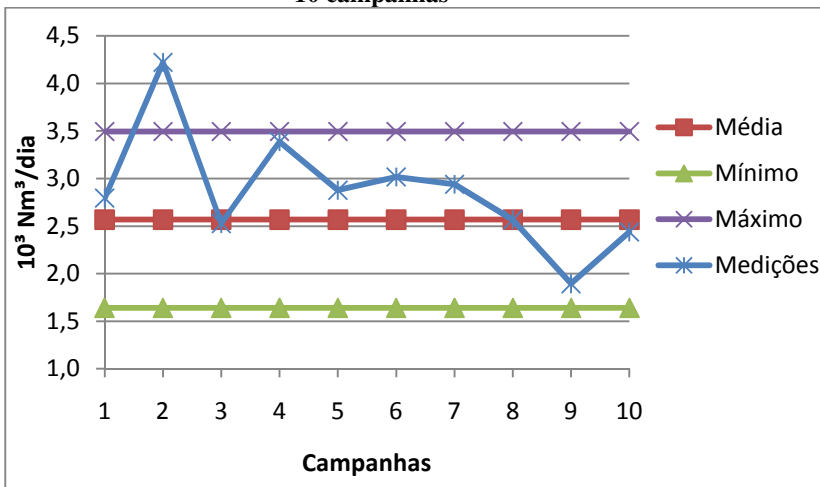


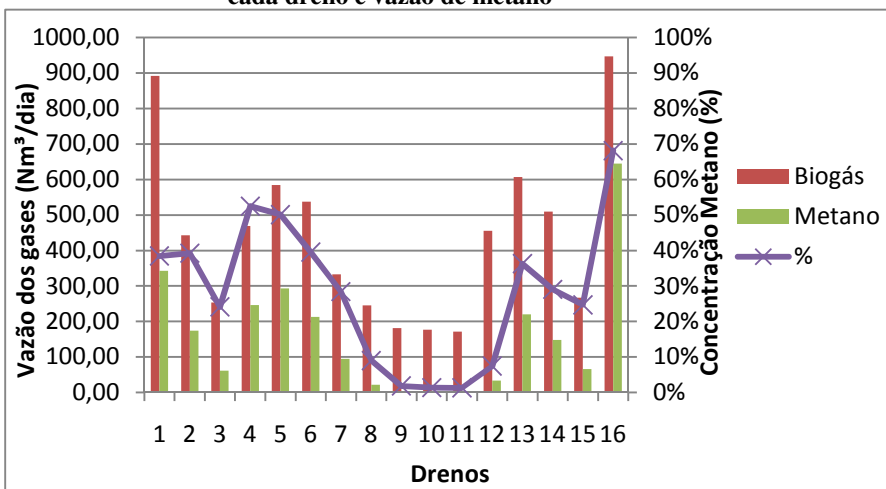
Gráfico 6.3 - Análise da média de metano medido no aterro durante 10 campanhas



Considerando o total de resíduos depositados até o momento da pesquisa (391.194,4 toneladas, Tabela 5.1), juntamente, com a médias das vazões de biogás estimadas no presente trabalho em 2010 para os drenos novos do aterro (2.581.608,72 Nm³ Biogás/ano) somadas aos valores estimados por Francisco, 2009 (8.160.217,4 Nm³ Biogás/ano), e a eficiência de coleta de 75%, temos o dado da taxa de geração atual de biogás do local de estudo do aterro sanitário Canhanduba de aproximadamente de 27,45 Nm³/T.ano. Esse valor, Segundo Dias (2009) *apud* Castilhos Jr. et al. (2003) é significativamente superior ao valor observado nas medições dos drenos de aterros sanitários dos Estados Unidos (1 a 14 m³/t.ano). Além disso, é superior também aos valores obtidos no aterro Delta, Campinas, que foram de 5,6 Nm³/T.ano.

Abaixo no gráfico 6.5, é possível analisar a relação que apresentam os drenos com alta vazão de biogás. Foi observado que os drenos centrais, localizados na divisa entre as células antigas e as células mais novas apresentam vazões superiores aos drenos periféricos, isto é resultante da influência dos fatores descritos anteriormente no capítulo de revisão bibliográfica, item 4.3.2, como a umidade que fica mais concentrada nestas áreas.

Gráfico 6.4 - Vazões médias por dreno, concentração de metano em cada dreno e vazão de metano



Na Tabela 6.6 podem ser observadas as concentrações médias ponderadas, em relação à vazão, com seus respectivos desvios padrão e valores máximos e mínimos dos outros gases analisados nas 10 amostragens dos drenos do aterro. Nesses cálculos foram desprezados os valores do dreno 16 que tiveram concentrações altíssimas superando a proporção de calibração do aparelho utilizado. No geral, as concentrações de H₂S foram baixas em todos os drenos, apresentando alto desvio padrão em relação ao valor médio. Os valores de concentração obtidos por dreno nas amostragens encontram-se no Apêndice A.

Tabela 6.6 - Concentração média dos gases

Gases		Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
CH ₄	(%)	25	3,4	1	52
CO ₂	(%)	21	4,6	0	43
O ₂	(%)	11	1,3	4	20
H ₂ S	(%)	6	2,2	2	13

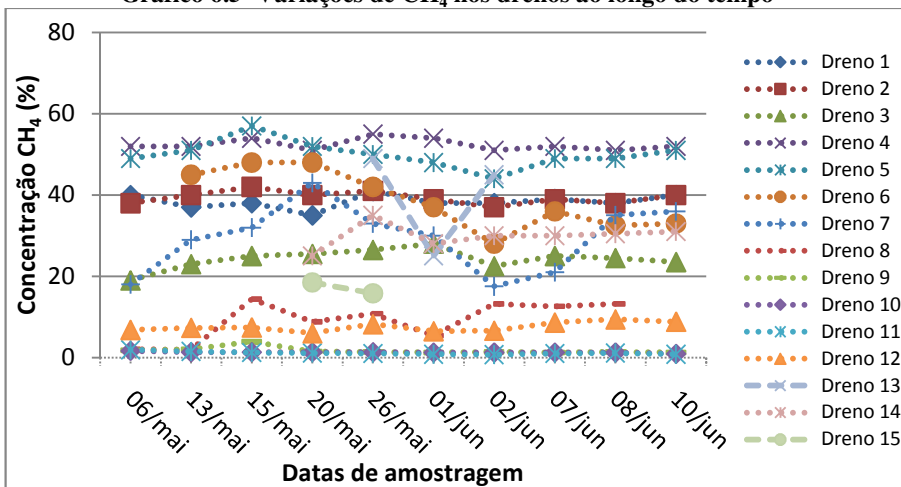
As concentrações médias de CH₄ foram maiores que as de CO₂ na maioria dos drenos, com exceção dos drenos 14 e 15. Entretanto, comparando-se as concentrações médias mostradas na

Tabela 6.6 com a curva de produção do biogás em aterros, segundo McBean, Rovers & Farquhar (1995), pode-se dizer que o aterro se encontra na fase III de produção do biogás. Nesta fase, há um aumento gradativo na produção do metano até que ele atinja 50% do volume. Os drenos 4 e 5 tiveram altas concentrações médias de CH_4 , com valores médios máximos de 57% no dreno 4 e mínimos de 44% no dreno 5. Estes drenos também tiveram altos valores médios de CO_2 , sendo o máximo de 52% no dreno 5 e o mínimo 37% no dreno 4.

Para o O_2 , observa-se baixíssima produção, condizente com o diagnosticado na literatura. Os drenos que apresentaram altas concentrações foram os de número 9, 10 e 11. Trata-se dos drenos laterais localizados acima da drenagem do lixiviado, com baixíssimas velocidades de saída de biogás, ou seja, baixa vazão. Estes valores de O_2 não são confiáveis, pois estão sujeitos a erros na medição. Sendo assim, para o O_2 , considera-se os drenos 1 e 3 onde tiveram médias máximas de 13,6% no dreno 3 e mínimas de 7,9 no dreno 1.

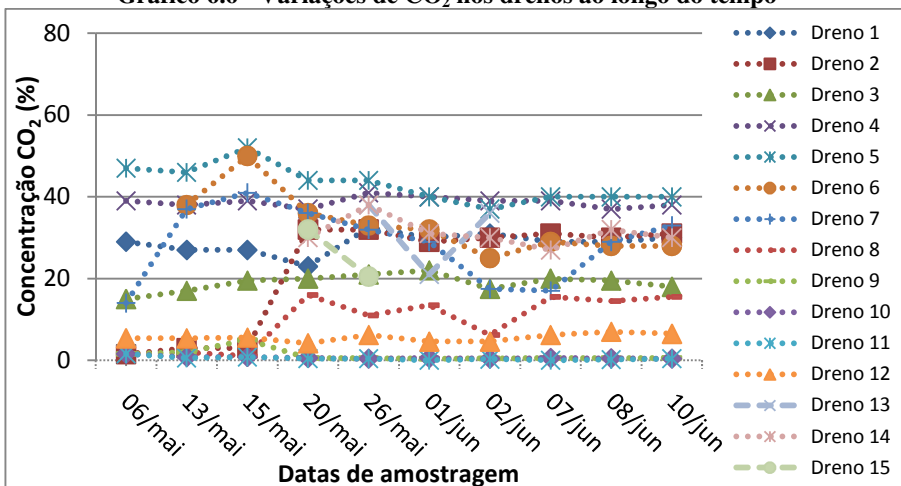
Os gráficos 6.6 a 6.9 apresentam as variações das concentrações de CH_4 , CO_2 , O_2 e H_2S , nos drenos de biogás, podendo-se verificar como se comportaram as variações dos valores ao longo do tempo.

Gráfico 6.5- Variações de CH_4 nos drenos ao longo do tempo



No Gráfico 6.5 nota-se que as concentrações ao longo do tempo tiveram pouca variação, com exceção do dreno 13 que apresentou uma grande queda na data de 01/06, voltando a um valor constante a partir da observação seguinte. Quanto ao comportamento do CO_2 , observa-se no Gráfico 6.6 que a maioria dos drenos teve variação semelhante ao de CH_4 .

Gráfico 6.6 - Variações de CO_2 nos drenos ao longo do tempo



No Gráfico 6.7 verifica-se que nos últimos dias de amostragem, onde se verificou uma ascensão nos valores de concentração de O_2 do dreno 3, coincidiram quedas de CH_4 e CO_2 apontadas anteriormente. Assim como no dreno 1, em que se verificou seu valor máximo no dia 20 de maio, houve quedas nos valores de CH_4 e CO_2 nesta mesma data.

Gráfico 6.7 - Variações de O_2 nos drenos ao longo do tempo

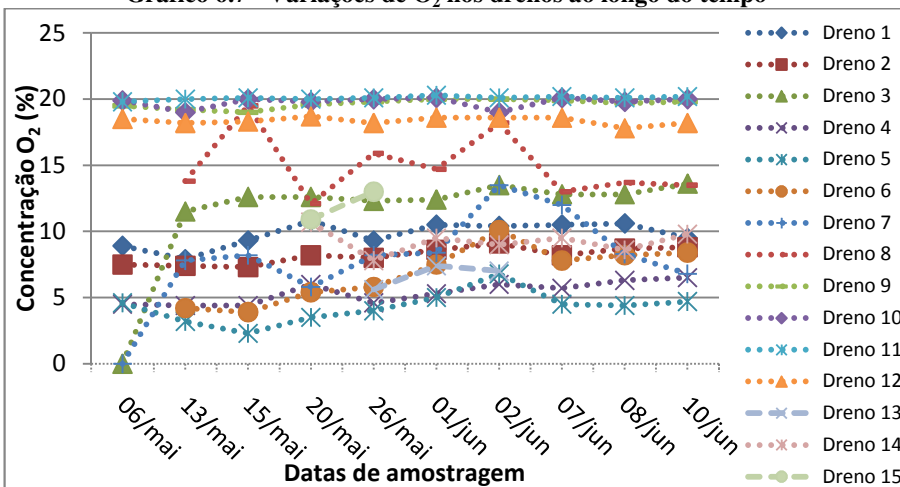
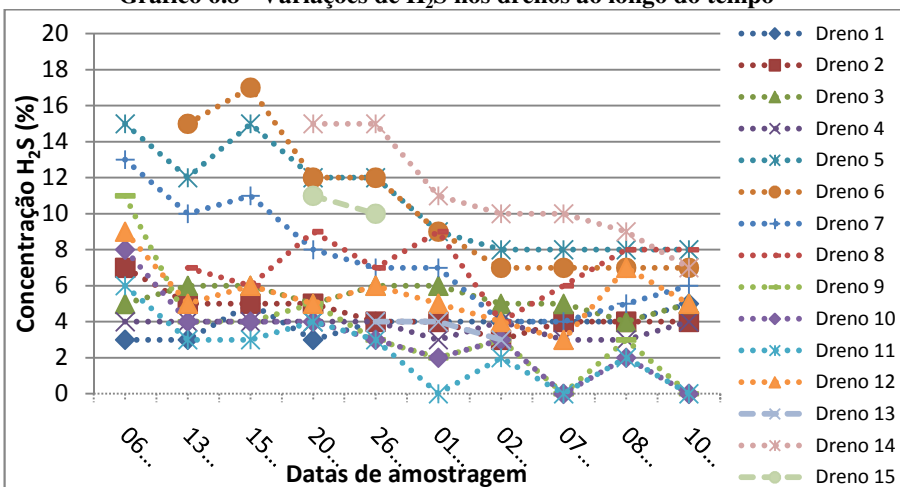


Gráfico 6.8 - Variações de H_2S nos drenos ao longo do tempo



No Gráfico 6.8 observa-se que a concentração de H_2S vai diminuindo ao longo do tempo. Conforme dito anteriormente, segundo McBean, Rovers & Farquhar (1995), nesta fase a produção de H_2 tende a diminuir. Sendo assim, a produção de H_2S é condizente com a bibliografia apresentada no item 4.3.1 onde a análise qualitativa da geração dos principais compostos ao longo das fases de degradação de um aterro sanitário é representada graficamente.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Na análise dos dados diários, a vazão média dos drenos estudados é de 442,06 Nm³/dia de biogás, sendo que o volume total médio produzido em um dia é de 7072,9 Nm³ de biogás. Em relação a vazão de metano, pode-se observar que a vazão média diária é de 160,5 Nm³ CH₄/dia enquanto o total produzido em um dia é 2568,01 Nm³ CH₄.
- Na análise qualitativa, pode-se observar que apenas 20% dos drenos apresentaram uma concentração de metano considerada boa para o aproveitamento energético, entre 40% e 60%. Se considerarmos os drenos que apresentaram médias próximas ao valor mínimo aceitável para o aproveitamento, temos 38% de drenos aptos.
- Em comparação ao estudo feito por Francisco (2009) no aterro de Canhanduba, nota-se que a produção de metano nos drenos estudados no presente trabalho é menor. Em 2009, constatou-se que mais de 50% dos drenos apresentaram concentração de metano boa ao aproveitamento energético. Isso se deve ao fato de que o estudo realizado no ano anterior foi feito em células do aterro com tempo de deposição maior do que as estudadas em 2010, ou seja, a matéria orgânica presente encontrava-se em estágio mais avançado de degradação.
- Em relação à estimativa teórica de geração de metano, os dados que mais se adequaram, com as medições da vazão instantânea, foram os dados do cenário 3, justamente os dados que levam em conta a qualidade do resíduo e as condições climáticas locais. Podendo-se concluir que estes fatores influenciam em grande parte a geração de biogás em aterros sanitários. Os coeficientes que sofreram alterações dentre os cenários foram L_0 e k , sendo que para o aterro sanitário Canhanduba, estes coeficientes são 180 e 0,06, respectivamente.
- A vazão máxima de biogás no aterro será de 26.248.866,56 m³/ano, referente ao ano de 2029, ano de encerramento das atividades de deposição de resíduos no aterro. Considerando que a concentração média do metano no biogás medido é de 36%. Os demais métodos encontram

um pico na produção um ano após o encerramento das atividades do aterro, isto acontece devido a utilização do dado de depósito de resíduos, porém não acarreta em grandes erros nos demais cálculos.

- Verificou-se que nas campanhas do dia 13 e 20 de maio, a produção de biogás era maior. Isto se deve ao fato de que na semana em que foram realizadas tais medições, houve a ocorrência de chuvas. Confirma-se que a umidade está diretamente relacionada com a produção de gases de aterro, conforme já explicitado em bibliografia.
- A geração de energia é uma solução adequada para a utilização do biogás dos aterros sanitários. Quando o aterro recebe insumos através de MDL, o investimento é pago pela empresa interessada na redução das emissões dos GEE.
- Recomenda-se uma pesquisa detalhada em relação a viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás para o aterro sanitário Canhanduba.
- Estimar a capacidade de aproveitamento da energia térmica disponível pela evaporação do lixiviado.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/protabl.asp?c=202&z=t&o=1&i=P>

ABREU, F. C.; PECORA, V.; VELÁZQUEZ; & COELHO, S. T.; **Biogás de aterro para geração de eletricidade e iluminação**. Universidade de São Paulo (USP), IEE/CENBIO – Instituto de Eletrotécnica e Energia / Centro Nacional de Referência em Biomassa. São Paulo, SP, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004: resíduos sólidos: classificação*. Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 10005: lixiviação de resíduos: procedimento*. Rio de Janeiro, 1986.

_____. *NBR 10006: solubilização de resíduos: procedimento*. Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 10007: amostragem de resíduos: procedimento*. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 1992. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL - SANTA CATARINA (ABES/SC). **Verificação da sustentabilidade das ações do programa “Lixo nosso de cada dia” realizado pelo Ministério Público de Santa Catarina**. Relatório do plano de pesquisa, listando os problemas e conflitos emergentes. ABES/SC, 2006. 204p.

BRITO FILHO, L.F., **Estudo de Gases em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

CALDERONI, S. **Os Bilhões Perdidos no Lixo**. 2º Ed. São Paulo. Ed. Humanitas FFLCH/Universidade de São Paulo. 1998. 343p.

CASSINI, S. T.; VAZOLLER, R. F.; PINTO, M. T. In: **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. CASSINI, S. T. (Coordenador). Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003. p. 1-9.

CASTILHOS JR, A. B.; MEDEIROS, P. A.; FIRTA, I. N.; LUPATINI, G.; SILVA J. D. **Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos**. In: Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para municípios de pequeno porte. CASTILHOS JR, A. B. (Coordenador). Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003. p. 19-50.

CASTILHOS JR, A. B. et al. **Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos**. Capítulo 1 – Prosab. Florianópolis: UFSC, 2007. 274p.

CASTILHOS JR, A. B.; REICHERT, G. A. **Projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários**. CASTILHOS JR, A. B. (Coordenador). Florianópolis: UFSC, 2007. 92p.

COMLURB - Companhia de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro. **Relatório final do trabalho de caracterização dos resíduos Urbanos coletados nos domicílios da cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2002.

CQNUMC, Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima. **Status atual das atividades de projeto no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil e no mundo**. Última compilação do site da CQNUMC: 04 de março de 2010. Acessado pelo site do MCT: www.mct.gov.br no dia 05 de abril de 2010.

D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 2.ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000. 370p.

DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. 476p.

DUARTE, A. C. Projetos de MDL em Aterros Sanitários no Brasil: Alternativa para o Desenvolvimento Sustentável. Dissertação Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 124p, 2006

EL-FADEL M.; FINDIKAKIS A.N.; LECKIE J.O. *Environmental Impacts of Solid Waste Landfilling. Journal of Environmental Management*, v. 50, n., p. 1-25, 1997.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas - SP.** Campinas, 2003. 145p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

ESMAP. **The world bank handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean.** Waterloo, Ontario, 2004.

FRANCISCO, M. Z. **Estudo da produção de biogás no aterro sanitário Canhanduba - Itajaí/sc, e o potencial para aproveitamento energético.** 2009. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **“Censo populacional.”** Brasília, 2000.

- **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico.** Brasília, 2000.

JUCÁ, J. F. T. **Destinação atual dos resíduos sólidos no Brasil: situação atual e perspectivas.** In: 10º Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais. Portugal, 2002.

LEITE, V. D.; WILTON, S. L.; BELLI FILHO, P.; PINTO, R. O.; CASTILHOS JR, A. B.; SOARES, H. M.; LIBÂNIO, P. A. C. **Bioestabilização de resíduos sólidos orgânicos.** In: Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás.

CASSINI, S. T. (Coordenador). Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003. p.95-119.

MCBEAN, E. A.; ROVERS, F. A.; FARQUAR, G. J. **Solid waste landfill engineering and design**. Presentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ 07458, 1995. 521p.

MACIEL, F.J. **Estudo da Geração, Percolação e Emissão de Gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE**. Recife, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco.

MONTEIRO, Jose Henrique Penido et al. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

OLIVEIRA, L.B. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e abatimento de emissões de gases do efeito estufa**. Rio de Janeiro, 2000. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

OROFINO, F. V. G. **Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis**. Florianópolis: COMCAP, 2002. 112p.

PALMISANO, A.C.; BARLAZ, M.A. *Microbiology of solid waste*. Boca Raton, Flórida, USA: CRC Press, 1996.

PARK, S.; CHOI, K. S.; JOE, K. S.; KIM, W. H.; KIM, H. S. *Variations of landfill leachate's properties in conjunction with the treatment process*. Environmental Technology. V. 22, 2001.

SANTANGELO, V. S. ; OLIVEIRA, D. M. ; Dias, V. C. F ; CASTILHOS JR., A. B. . **Estimativa da produção de biogás no aterro sanitário de Timbó/SC**. In: 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2009, Recife - PE. ABES, 2009.

SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO URBANO E MEIO AMBIENTE (SDM). **Diagnóstico do**

levantamento de dados dos resíduos sólidos nos municípios do estado, com revisão das diretrizes para a formulação da política estadual dos resíduos sólidos. Florianópolis, outubro, 2001.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Integrated solid waste management: engineering principles and management issues.** McGraw-Hill, Hightstown, NJ, 1993. 978p.

TEIXEIRA, E. N. **Resíduos sólidos: minimização e reaproveitamento energético.** In: Seminário Nacional sobre reuso/reciclagem de resíduos sólidos industriais. Anais. São Paulo: SEMA, 2000.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). *Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills – Background Information for Proposed Standards and Guidelines. Emission Standards Division.* March 1991. EPA-450/3-90-011a.

9 APÊNDICES

9.1 APÊNDICE A – Tabelas resultantes das medições em campo

6-mai

Dreno	Veloc (m/s)	Temp Anem (°C)	Vazão Nm³/s	Vazão Nm³/dia	Concentrações			Vazões (Nm³/dia)			H ₂ S (ppm)
					CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	O ₂ (%)	CO ₂	CH ₄	O ₂	
1	5	50,1	0,0212	1834,92	29	40	9	532,13	733,97	163,3 1	3,0
2	1,2	47	0,0052	444,64	2	38	8	6,67	168,96	33,35	7,0
3	1,1	66	0,0044	384,76	15	19	0	57,71	73,10	0,00	5,0
4	1,5	48	0,0064	554,07	39	52	5	216,09	288,12	24,93	4,0
5	1,2	44,5	0,0052	448,14	47	49	5	210,63	219,59	20,61	40,0
6	acessível	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	1,1	36	0,0049	422,09	14	18	0	59,09	75,98	0,00	13,0
8	acessível	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	1,25	33	0,0056	484,35	2	2	20	7,75	8,72	94,45	11,0
10	1,4	27,8	0,0063	551,85	2	2	20	8,83	8,83	109,82	8,0
11	1,5	32,1	0,0067	582,94	2	2	20	9,33	11,08	115,42	6,0
12	1,5	36	0,0066	575,58	5	7	19	31,08	39,14	106,48	9,0
13	acessível	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	acessível	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	acessível	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
*	2,5	43,5	0,0108	936,58	43	65	3	402,73	608,78	28,10	5

13-mai

Dreno	Veloc (m/s)	Temp Anem (°C)	Vazão Nm³/s	Vazão Nm³/dia	Concentrações			Vazões (Nm³/dia)			H ₂ S (ppm)
					CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	O ₂ (%)	CO ₂	CH ₄	O ₂	
1	2,70	37,5	0,01193	1031,04	27	37	8	278,38	381,49	81,45	3,0
2	1,30	39,5	0,00571	493,25	3	40	7	14,80	197,30	36,50	5,0
3	1,10	45,2	0,00474	409,89	17	23	11,5	69,68	94,28	47,14	6,0
4	1,15	46,5	0,00494	426,78	38	52	4	162,18	221,93	18,78	4,0
5	2,30	40,4	0,01007	870,17	46	51	3	400,28	443,79	27,85	12,0
6	1,70	39,8	0,00746	644,40	38	45	4	244,87	289,98	27,07	15,0
7	1,10	32,0	0,00495	427,63	37	29	7,8	158,22	124,01	33,35	10,0
8	0,70	30,5	0,00317	273,47	2	2	14	5,47	5,47	37,74	7,0
9	0,85	28,2	0,00387	334,61	2	2	19	6,69	6,69	64,24	4,0
10	0,35	27,6	0,00160	138,05	1	1	19	1,10	1,79	26,23	4,0
11	0,37	27,9	0,00169	145,80	1	2	20	0,87	2,19	29,16	3,0
12	1,20	32,3	0,00539	466,04	5	7	18	25,17	34,02	84,82	5,0
13	acessível	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	acessível	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	acessível	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
*	6,70	55,0	0,02803	2422,07	45	65	3	1089,9	1574,4	72,66	6,0

15-mai

Dreno	Veloc (m/s)	Temp. Anem (°C)	Vazão Nm³/s	Vazão Nm³/dia	Concentrações			Vazões (Nm³/dia)			H ₂ S (ppm)
					CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	O ₂ (%)	CO ₂	CH ₄	O ₂	
1	1,8	41,8	0,0078	677,98	27,0	38,0	9,3	183,05	257,63	63,05	5,0
2	0,65	37,1	0,0028	248,53	3,0	42,0	7,3	7,46	104,38	18,14	5,0
3	1,7	69	0,0068	589,41	19,5	25,0	12,6	114,93	147,35	74,27	6,0
4	2,1	42	0,0091	790,47	39,0	54,0	4,4	308,28	426,86	34,78	4,0
5	1,65	40,2	0,0072	624,65	52,0	57,0	2,3	324,82	356,05	14,37	15,0
6	1,33	38,5	0,0058	506,25	50,0	48,0	3,9	253,13	243,00	19,74	17,0
7	0,55	33	0,0024	213,11	41,0	32,0	8,2	87,38	68,20	17,48	11
8	0,45	27	0,0020	177,85	1,0	1,9	19,5	1,78	3,38	34,68	6,0
9	0,5	27	0,0022	197,61	5,0	3,9	19,0	9,88	7,71	37,55	4,0
10	0,4	26	0,0018	158,62	0,8	1,3	20,0	1,27	2,06	31,72	4,0
11	0,4	25,6	0,0018	158,83	0,8	1,2	20,1	1,27	1,91	31,93	3,0
12	1	31,8	0,0045	389,01	5,6	7,4	18,3	21,78	28,79	71,19	6,0
13	acessível	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	acessível	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	acessível	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
*	1,45	39	0,0063	551,048	43,0	68,0	5,0	236,95	374,71	27,552	6,0

20-mai											
Dreno	Veloc (m/s)	Temp. Anem (°C)	Vazão Nm³/s	Vazão Nm³/dia	Concentrações			Vazões (Nm³/dia)			H ₂ S (ppm)
					CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	O ₂ (%)	CO ₂	CH ₄	O ₂	
1	2,8	35	0,0124	1077,91	23,0	35,0	10,8	247,92	377,27	116,4 1	3,0
2	1,3	33,8	0,0058	502,41	32,0	40,0	8,2	160,77	200,97	41,20	5,0
3	0,2	48,5	0,0008	73,76	20,0	25,5	12,6	14,75	18,81	9,29	5,0
4	1,3	33,1	0,0058	503,56	37,0	51,0	6,0	186,32	256,82	30,21	4,0
5	1,85	38,2	0,0081	704,87	44,0	52,0	3,5	310,14	366,53	24,67	12,0
6	1,8	38	0,0079	686,26	36,0	48,0	5,4	247,05	329,40	37,06	12,0
7	0,75	28,8	0,0034	294,653	36,0	43,0	5,8	106,08	126,70	17,09	8,0
8	0,4	25	0,0018	159,15	16,0	14,4	12,1	25,46	22,92	19,26	9,0
9	0,3	22,5	0,0013	120,37	0,6	1,5	19,6	0,72	1,81	23,59	5,0
10	0,6	22	0,0027	241,15	0,6	1,3	19,8	1,45	3,13	47,75	4,0
11	0,2	23,8	0,0009	79,90	0,4	1,1	20,0	0,32	0,88	15,98	4,0
12	0,97	30	0,0043	379,58	4,2	6,0	18,7	15,94	22,77	70,98	5,0
13	FOGO	FOGO	FOGO	FOGO	FOGO	FOGO	FOGO	FOGO	FOGO	FOGO	FOGO
14	2,5	38,4	0,0110	951,912	30,0	25,0	10,7	285,57	237,98	101,85	15,0
15	0,5	32	0,0022	194,375	32,0	18,5	10,9	62,20	35,96	21,19	11,0
*	2,7	43,5	0,0117	1011,50	48,0	70,0	2,7	485,52	708,06	27,31	5,0

26-mai											
Dreno	Veloc (m/s)	Temp. Anem (°C)	Vazão Nm³/s	Vazão Nm³/dia	Concentrações			Vazões (Nm³/dia)			H ₂ S (ppm)
					CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	O ₂ (%)	CO ₂	CH ₄	O ₂	
1	2,2	43,5	0,0095	824,19	32,4	41,0	9,3	267,04	337,92	76,65	4,0
2	1,1	42,8	0,0047	413,01	32,0	41,0	8,0	132,16	169,33	33,04	4,0
3	0,15	62	0,0006	53,09	21,0	26,5	12,3	11,15	14,07	6,53	6,0
4	0,87	42,8	0,0037	326,65	41,0	55,0	4,6	133,93	179,66	15,03	4,0
5	1,05	41,5	0,0045	395,86	44,0	50,0	4,0	174,18	197,93	15,83	12,0
6	1,6	40,3	0,0070	605,53	33,0	42,0	5,8	199,83	254,32	35,12	12,0
7	1,1	33,5	0,0049	425,534	32,0	33,0	8,2	136,17	140,43	34,89	7,0
8	0,6	28,2	0,0027	236,19	11,0	8,8	15,9	25,98	20,78	37,55	7,0
9	0,3	26,3	0,0013	118,85	0,6	1,4	19,8	0,71	1,66	23,53	3,0
10	0,4	26,3	0,0018	158,46	0,4	1,3	20,0	0,63	2,06	31,69	3,0
11	0,15	26,8	0,0006	59,32	0,4	1,0	20,1	0,24	0,59	11,92	3,0
12	0,85	31,3	0,0038	331,20	6,2	8,2	18,2	20,53	27,16	60,28	6,0
13	1	39,7	0,0043	379,182	38,0	49,0	5,6	144,09	185,80	21,23	4,0
14	0,85	49,5	0,0036	312,515	38,0	35,0	7,8	118,76	109,38	24,38	15,0
15	1,6	40,3	0,0070	605,531	20,5	15,8	13,0	124,13	95,67	78,72	10,0

*	2,15	42,8	0,0093	807,244	34,0	70,0	2,8	274,46	565,07	22,60	4,0
---	------	------	--------	---------	------	------	-----	--------	--------	-------	-----

1-jun											
Dreno	Veloc (m/s)	Temp. Anem (°C)	Vazão Nm³/s	Vazão Nm³/dia	Concentrações			Vazões (Nm³/dia)			H ₂ S (ppm)
					CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	O ₂ (%)	CO ₂	CH ₄	O ₂	
1	1,6	36,8	0,0070	612,37	30,0	38,0	10,5	183,71	232,70	64,30	4,0
2	1,3	37	0,0057	497,23	29,0	39,0	8,6	144,20	193,92	42,76	4,0
3	1,28	35,1	0,0057	492,60	22,0	28,0	12,4	108,37	137,93	61,08	6,0
4	1,3	34,5	0,0058	501,27	40,0	54,0	5,3	200,51	270,69	26,57	3,0
5	1,63	37,3	0,0072	622,85	40,0	48,0	5,0	249,14	298,97	31,14	9,0
6	1,39	35	0,0061	535,10	32,0	37,0	7,5	171,23	197,99	40,13	9,0
7	0,7	32,1	0,0031	272,036	29,0	30,0	8,4	78,89	81,61	22,85	7,0
8	0,98	32,2	0,0044	380,73	13,5	10,8	14,7	51,40	41,12	55,97	9,0
9	0,2	25,4	0,0009	79,47	0,4	1,2	20,0	0,32	0,95	15,89	2,0
10	0,3	26,1	0,0013	118,92	0,6	1,2	20,1	0,71	1,43	23,90	2,0
11	0,4	26,7	0,0018	158,25	0,0	0,8	20,3	0,00	1,27	32,12	0,0
12	1,6	30,5	0,0072	625,07	4,6	6,5	18,6	28,75	40,63	116,26	5,0
13	2,3	41,5	0,0100	867,131	21,0	25,0	7,4	182,10	216,78	64,17	4,0
14	1,2	42,2	0,0052	451,412	31,0	28,0	9,5	139,94	126,40	42,88	11,0
15	tombado	tombado	tombado	tombado	tombado	-	-	tombado	tombado	tombado	tombado
*	2,2	42,5	0,0095	826,802	36,0	69,0	3,0	297,65	570,49	24,80	5,0

2-jun											
Dreno	Veloc (m/s)	Temp. Anem (°C)	Vazão Nm³/s	Vazão Nm³/dia	Concentrações			Vazões (Nm³/dia)			H ₂ S (ppm)
					CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	O ₂ (%)	CO ₂	CH ₄	O ₂	
1	1,85	36,8	0,0081	708,05	31,0	38,0	10,4	219,50	269,06	73,64	4,0
2	1,3	36,1	0,0057	498,68	30,0	37,0	9,1	149,60	184,51	45,38	4,0
3	0,2	55,2	0,0008	72,26	17,5	22,5	13,5	12,64	16,26	9,75	6,0
4	1,4	35,2	0,0062	538,60	39,0	51,0	6,0	210,06	274,69	32,32	4,0
5	1,75	36,5	0,0077	670,43	37,0	44,0	6,8	248,06	294,99	45,59	12,0
6	1,4	35,9	0,0062	537,38	25,0	28,0	10,1	134,35	150,47	54,28	12,0
7	1,45	35,1	0,0064	558,019	17,5	17,5	13,5	97,65	97,65	75,33	7,0
8	0,75	25,6	0,0034	297,81	6,2	5,4	18,2	18,46	16,08	54,20	7,0
9	0,2	25,2	0,0009	79,52	0,5	1,4	20,0	0,40	1,11	15,90	3,0
10	0,3	26	0,0013	118,96	0,4	1,2	19,0	0,48	1,43	22,60	3,0
11	0,4	26,5	0,0018	158,35	0,3	0,7	20,1	0,48	1,11	31,83	3,0
12	1,3	28,5	0,0059	511,24	4,6	6,6	18,6	23,52	33,74	95,09	6,0
13	1,5	36,8	0,0066	574,095	36,0	45,0	7,0	206,67	258,34	40,19	4,0
14	1,3	43,5	0,0056	487,022	30,0	30,0	9,0	146,11	146,11	43,83	15,0

15	tombado	tom	tombado	tombado	tombado	-	-	tombado	tombado	tombado	tombado
*	2,3	42,1	0,0100	865,481	35,0	70,0	2,8	302,92	605,84	24,23	4,0

7-jun											
Dreno	Veloc (m/s)	Temp. Anem (°C)	Vazão Nm³/s	Vazão Nm³/dia	Concentrações			Vazões (Nm³/dia)			H₂S (ppm)
					CO₂ (%)	CH₄ (%)	O₂ (%)	CO₂	CH₄	O₂	
1	2,25	38	0,0099	857,82	29,0	39,0	39,0	248,77	334,55	334,55	4,0
2	1,2	38,5	0,0052	456,77	31,0	39,0	39,0	141,60	178,14	178,14	4,0
3	0,21	58,2	0,0008	75,18	20,0	25,0	25,0	15,04	18,80	18,80	6,0
4	1,15	40,3	0,0050	435,23	39,0	52,0	52,0	169,74	226,32	226,32	4,0
5	1,53	38,9	0,0067	581,64	40,0	49,0	49,0	232,65	285,00	285,00	12,0
6	1,2	37,5	0,0053	458,24	29,0	36,0	36,0	132,89	164,97	164,97	12,0
7	0,4	28,5	0,0018	157,304	17,0	21,0	21,0	26,74	33,03	33,03	7,0
8	0,6	25,5	0,0027	238,33	15,5	13,2	13,2	36,94	31,46	31,46	7,0
9	0,65	22,6	0,0030	260,72	0,6	1,2	1,2	1,56	3,13	3,13	3,0
10	0,2	21,6	0,0009	80,49	0,6	1,2	1,2	0,48	0,97	0,97	3,0
11	0,2	23,9	0,0009	79,87	0,0	1,0	1,0	0,00	0,80	0,80	3,0
12	1,25	31,5	0,0056	486,74	6,2	8,6	8,6	30,18	41,86	41,86	6,0
13	tombado	tombado	tombado	tombado	tombado	-	-	tombado	tombado	tombado	tombado
14	1,1	42	0,0047	414,057	27,0	30,0	9,5	111,80	124,22	39,34	15,0
15	tombado	tombado	tombado	tombado	tombado	-	-	tombado	tombado	tombado	tombado
*	2,3	39,7	0,0100	872,120	41,0	70,0	2,9	357,57	610,48	25,29	4,0

8-jun											
Dreno	Veloc (m/s)	Temp. Anem (°C)	Vazão Nm³/s	Vazão Nm³/dia	Concentrações			Vazões (Nm³/dia)			H₂S (ppm)
					CO₂ (%)	CH₄ (%)	O₂ (%)	CO₂	CH₄	O₂	
1	1,5	36,2	0,0066	575,21	29,0	38,0	10,6	166,81	218,58	60,97	4,0
2	1,18	34,8	0,0052	454,56	30,0	38,0	8,7	136,37	172,73	39,55	4,0
3	0,2	54,5	0,0008	72,41	19,5	24,5	12,8	14,12	17,74	9,27	6,0
4	0,45	39,9	0,0019	170,52	37,0	51,0	6,3	63,09	86,97	10,74	4,0
5	0,79	40,5	0,0034	298,79	40,0	49,0	4,4	119,52	146,41	13,15	12,0
6	1,15	35,2	0,0051	442,42	28,0	32,5	8,2	123,88	143,79	36,28	12,0
7	0,72	29,1	0,0032	282,586	29,0	35,0	8,3	81,95	98,91	23,45	7,0
8	0,55	27,8	0,0025	216,80	14,5	12,6	13,7	31,44	27,32	29,70	7,0
9	0,24	23,0	0,0011	96,14	0,6	1,4	19,7	0,58	1,35	18,94	3,0
10	0,3	25,1	0,0013	119,32	0,5	1,2	19,8	0,60	1,43	23,63	3,0
11	0,4	26,3	0,0018	158,46	0,2	1,1	20,1	0,32	1,74	31,85	3,0
12	0,8	26,7	0,0036	316,50	7,0	9,4	17,8	22,15	29,75	56,34	6,0
13	tombado	tombado	tombado	tombado	tombado	-	-	tombado	tombado	tombado	tombado
14	1,33	41,4	0,0058	501,587	32,0	30,5	8,6	160,51	152,98	43,14	15,0
15	tombado	tombado	tombado	tombado	tombado	-	-	tombado	tombado	tombado	tombado

*	1,51	36,7	0,0066	578,109	46,0	72,0	2,9	265,93	416,24	16,77	4,0
---	------	------	--------	---------	------	------	-----	--------	--------	-------	-----

10-jun

Dreno	Velo c (m/s)	Tem p. Ane m (°C)	Vazão Nm³/s	Vazão Nm³/dia	Concentrações			Vazões (Nm³/dia)			H ₂ S (ppm)
					CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	O ₂ (%))	CO ₂	CH ₄	O ₂	
1	1,9	41,4	0,0082	716,55	30,0	40,0	9,5	214,97	286,62	68,07	4,0
2	1,09	34,4	0,0048	420,43	31,0	40,0	8,8	130,33	168,17	37,00	4,0
3	0,8	31,1	0,0036	311,92	18,0	23,5	13,6	56,15	73,30	42,42	6,0
4	1,15	33,2	0,0051	445,31	38,0	52,0	6,5	169,22	231,56	28,95	4,0
5	1,65	38,5	0,0072	628,06	40,0	51,0	4,7	251,22	320,31	29,52	12,0
6	1,1	35,1	0,004	423,33	28,0	33,0	8,4	118,53	139,70	35,56	12,0
7	0,7	31,2	0,0038	272,840	33,0	36,0	6,8	90,04	98,22	18,55	7,0
8	0,59	30,9	0,0026	230,19	15,5	13,2	13,5	35,68	30,39	31,08	7,0
9	0,1	25,1	0,0004	39,77	0,6	1,2	19,8	0,24	0,48	7,88	3,0
10	0,2	23,4	0,0009	80,00	0,4	0,9	20,0	0,32	0,72	16,00	3,0
11	0,33	22	0,0015	132,63	0,4	0,8	20,2	0,53	1,06	26,79	3,0
12	1,2	25,2	0,0055	477,13	6,5	8,8	18,2	31,01	41,99	86,84	6,0
13	tombado	tombado	tombado	tombado	tombado	-	-	tombado	tombado	tombado	tombado
14	1,2	43,1	0,0052	450,127	30,0	31,0	9,8	135,04	139,54	44,11	15,0
15	tombado	tombado	tombado	tombado	tombado	-	-	tombado	tombado	tombado	tombado
*	1,56	36	0,0069	598,604	40,0	70,0	2,8	239,44	419,02	16,76	4,0

9.2 APENDICE B

Vazão BIOGÁS (Nm³/dia)

Dreno	n	Média	Desvio Padrão	Mínima	Máxima
1	10	891,60	351,81	677,98	1834,92
2	10	442,95	71,87	248,53	502,41
3	10	253,53	196,22	53,09	589,41
4	10	469,25	151,82	326,65	790,47
5	10	584,55	156,29	395,86	870,17
6	9	537,66	86,62	506,25	686,26
7	10	332,58	115,18	213,11	427,63
8	9	245,61	62,39	159,15	273,47
9	10	181,14	133,24	118,85	484,35
10	10	176,58	132,52	138,05	551,85
11	10	171,44	141,95	59,32	582,94
12	10	455,81	96,33	331,20	575,58
13	3	606,80	200,54	379,18	379,18
14	7	509,80	89,16	312,52	951,91
15	2	266,64	245,02	194,38	605,53
16	10	946,96	513,87	551,05	2422,07
TOTAL	10	7072,90	2744,84	4665,19	12528,15
MÉDIA DOS DRENOS		442,0562874			
TOTAL POR ANO		2.581.608,72			

Vazão METANO (Nm³/dia)

Dreno	n	Média	Desvio Padrão	Mínima	Máxima
1	10	342,98	141,13	218,58	733,97
2	10	173,84	25,93	104,38	200,97
3	10	61,16	49,41	14,07	147,35
4	10	246,36	81,79	86,97	426,86
5	10	292,96	83,00	146,41	443,79
6	9	212,62	65,57	139,70	329,40
7	10	94,47	30,07	33,03	140,43
8	9	22,10	11,60	3,38	41,12
9	10	3,36	2,95	0,48	8,72
10	10	2,39	2,24	0,72	8,83
11	10	2,26	2,98	0,59	11,08
12	10	33,98	6,43	22,77	41,99
13	3	220,31	29,72	185,80	216,78
14	7	148,09	39,13	109,38	237,98
15	2	65,82	29,86	35,96	95,67
*	10	645,30	325,59	374,71	1574,35
TOTAL	10	2568,01	927,40	1476,94	4659,27
MÉDIA DOS DRENOS		160,50048			
TOTAL POR ANO		937.322,79	Nm ³ /ano		